دراسات في

مبادئ الهندسة الكهربائية

الدكتور

خالد فتحي ماضي



دراسات في

مبادئ الهندسة الكهربائية

دراسات في

مبادئ الهندسة الكهربائية

تأليف

الدكتور

خالد فتحي عبد الفتاح ماضي

الطبعة الأولى

2013م – 1434هـ

مكتبة المجتمع العربي

مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع

رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية (2011/7/2723)

621.3

ماضي، خالد فتحي عبد الفتاح

دراسات في مبادئ الهندسة الكهربائية/ خالد فتحي عبد الفتاح ماضي.- عمان: مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع، 2011

( ) ص

ر.إ. : 2011/7/2723

الواصفات: /الهندسة الكهربائية

- يتحمل المؤلف كامل المسؤولية القانونية عن محتوى مصنفه ولا يعبر هذا المصنف عن رأي دائرة المكتبة الوطنية أو أي جهة حكومية

الطبعة العربية الأولى

2013م – 1434هـ

مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع

عمان – وسط البلد – ش. السلط – مجمع الفحيص التجاري

تلفاكس 4632739 ص.ب. 8244 عمان 11121 الأردن

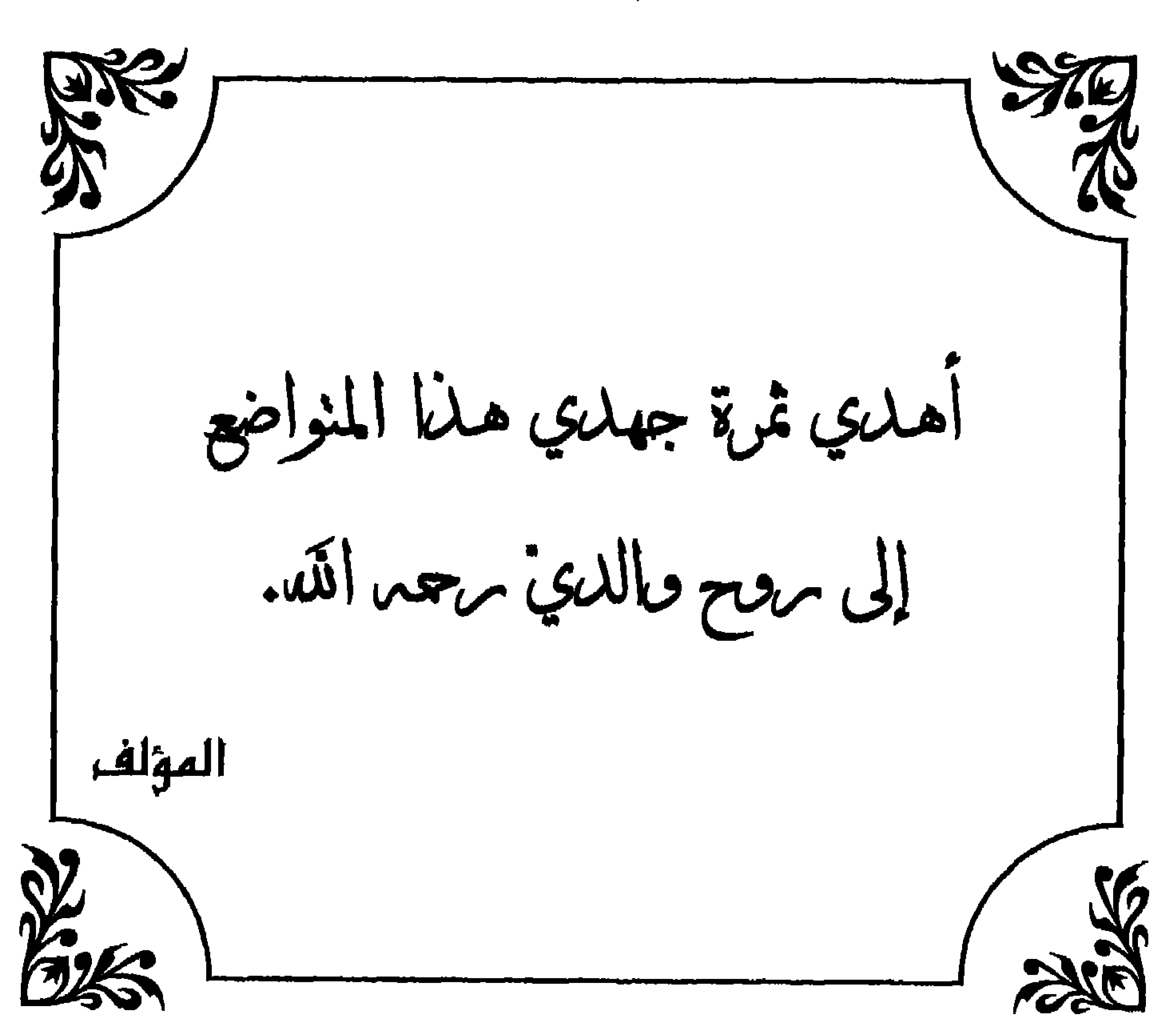
عمان – ش. الملكة رانيا العبد الله – مقابل كلية الزراعة – مجمع زهدي حصوة التجاري

www: muj-arabi-pub.com

Email: Moj_pub@hotmail.com

ISBN 978-9957-83-106-6 (ردمك)

الإهداء



أهدي ثمرة جهدي هذا المتواضع

إلى روح والدي رحمه الله.

المؤلف

المحتويات

الفصل الأول

الدائرة الكهربية

الدائرة الكهربية

الدائرة الكهربية البسيطة وقانون أوم:

يمكن تعريف الدائرة الكهربية البسيطة بأنها عبارة عن مسار مقفل للتيار الكهربي. وإذا اعتبرنا أية نقطة على هذا المسار نجد أن التيار يخرج منها في ناحية، ويعود إليها من الناحية الأخرى. ويمكن أن يتخذ المسار أي شكل هندسي، كما أنه قد يتكون من عدة عناصر مختلفة، تتصل مع بعضها البعض على التوالي أو التوازي. وعند تحليل الدائرة الكهربية البسيطة نجد أن لها ثلاث مقومات أساسية وهي:

أ. **القوة الدافعة الكهربية:** (Electro-motive-force e.m.f) وهي عبارة عن الضغط الكهربي الذي يعمل على دفع التيار الكهربي في مساره المقفل. ووحدة القياس هنا هي الفولت.

ب. **مسار التيار الكهربي:** يمر التيار الكهربي في أجهزة (قد تكون مصابيح أو محركات...إلخ) وتتصل هذه الأجهزة معاً على التوالي أو التوازي. بوساطة موصلات كهربية (وهي غالبا على شكل أسلاك)، وتكون هذه الأجهزة مع ينبوع القوة الكهربية مساراً مقفلاً للتيار الكهربي، وهو ما يطلق عليه اسم الدائرة الكهربية، كما سبق تعريفه. ويلاحظ أنه بالنسبة لحسابات الدائرة الكهربية لا يعنينا من أمر أي عنصر من عناصر هذه الدائرة، من أجهزة وموصلات كهربية، إلا بمقدار ما يتسبب عن وجوده من مقاومة أو ممانعة لمرور التيار الكهربي في الدائرة. ووحدة القياس هنا الأوم. ونظراً لأن الينبوع الكهربي يكون جزءاً من المسار، لذلك يجب اعتبار مقاومته أو ممانعته الداخلية عند عمل حسابات الدائرة الكهربية.

ج. **التيار الكهربي:** وهو الذي يسري في الدائرة الكهربية بفعل القوة الدافعة الكهربية، حاملاً الطاقة من الينبوع إلى الأجهزة المختلفة الموجودة بالدائرة. ووحدة قياسه هي الأمبير.

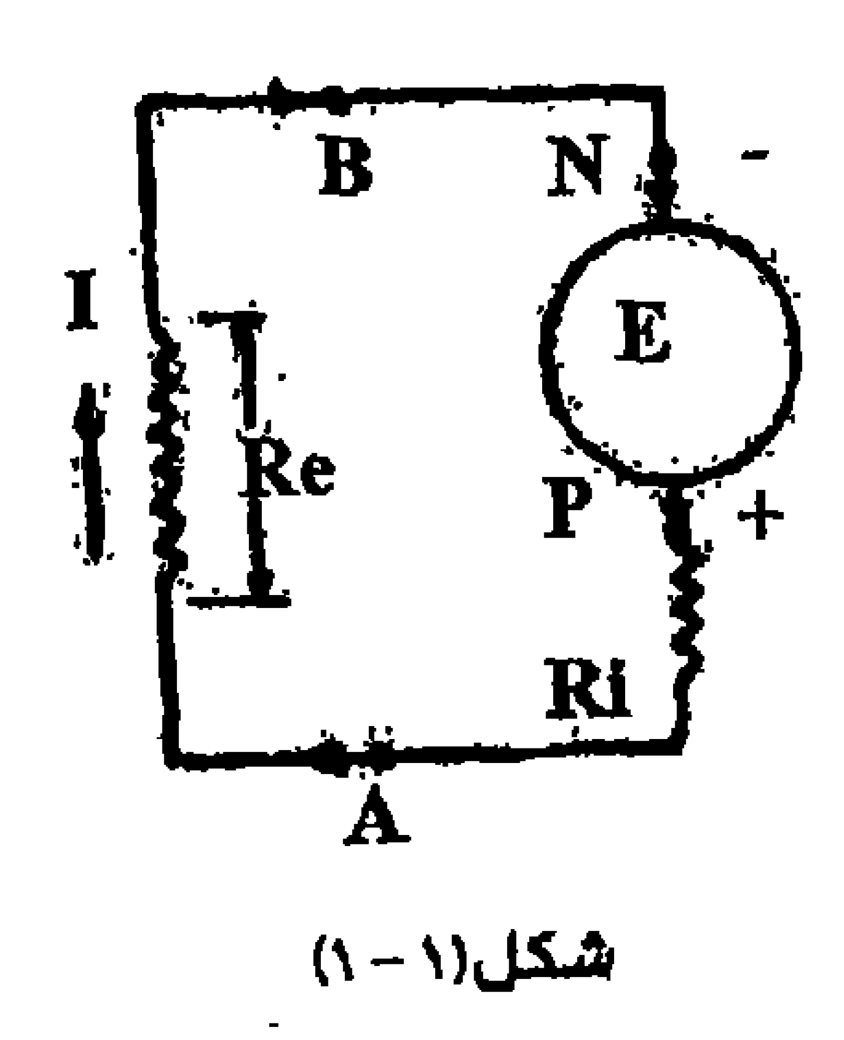
يتضح مما سبق أنه يمكن تمثيل الدائرة الكهربية البسيطة كما في شكل (1 –1) من ينبوع كهربي ذي قوة دافعة كهربية معينة E فولت، ومقاومة داخلية معينة Ri اوم (هذه بالنسبة لدائرة التيار المستمر، أما في حالة التيار المتردد فسوف نجد قوانين مماثلة تأخذ فيها المعاوقة والممانعة مكان المقاومة)، وعدة أجهزة وموصلات كهربية تمثل في مجموعها بالمقاومة R_e أوم. ويكون التيار الكهربي في هذه الحالة I امبير.

ويتص قانون أوم على أن: التيار = القوة الدافعة الكهربية / المقاومة الكلية في الدائرة

اي أن...
$$I = \frac{E}{R_e + Ri} \quad \text{.............} \quad (1 -1)$$

هذا ويمكن تقسيم الضغط الكهربي الذي تمثله القوة الدافعة الكهربية إلى قسمين:

أ. **الضغط الخارجي**، وهو الجزء من الضغط الكهربي الكلي الذي يدفع التيار في الأجهزة الخارجية الممثلة بالمقاومة R_e، اي من A إلى B.



شكل(١ – ١)

ب. **الضغط الداخلي**، وهو الجزء من الضغط الكهربي الكلي الذي يدفع التيار داخل الينبوع الكهربي نفسه، وهو الممثل بالمقاومة الداخلية Ri، اي من A إلى

B. وبذلك يكمل مرور التيار الكهربي في المسار المقفل من A في ناحية، لكي يعود إليها من الناحية الأخرى.

من المعادلة (1) نجد ان: $E = IR_e + IRi$ .... (2– 1)

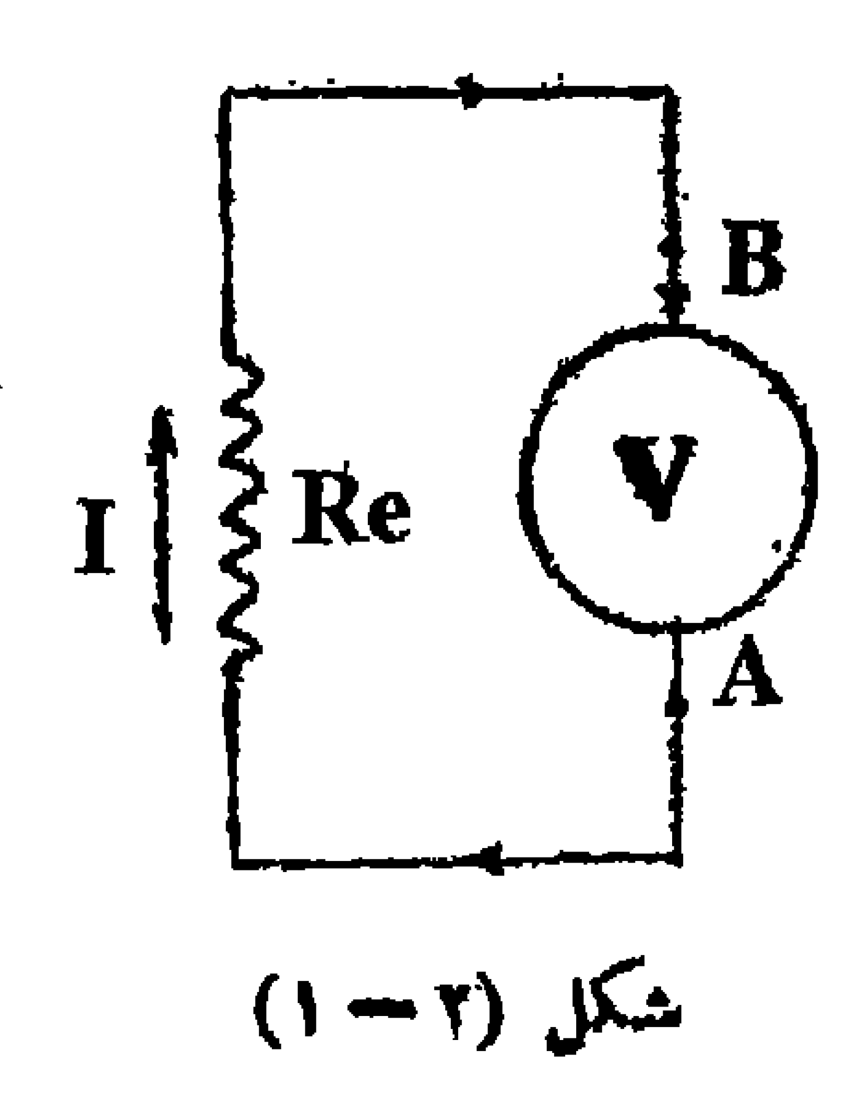
اي أن القوة الدافعة الكهربية = الضغط الخارجي + الضغط الداخلي. فإذا رمزنا للضغط الخارجي بالرمز V وللضغط الداخلي بالرمز v، نجد أن:

$$E = V + v$$

$$v = IRi \;،\; V = IR_e$$

أو $$I = \frac{V}{R_e} = \frac{v}{Ri} \quad .... (3– 1)$$

ومن هذا يتضح أنه يمكن الحصول على قيمة التيار الذي يدخل عند أية نقطة في الدائرة الكهربية ويخرج عند نقطة أخرى بقسمة الضغط الكهربي الذي يدفع التيار بين هاتين النقطتين على المقاومة الكهربية الموجودة بينهما. ويمكن في هذه الحالة اعتبار وجود ينبوع كهربي ذي مقاومة مهملة، ضغطه V، بين هاتين النقطتين A، B شكل (2– 1). فيما يلي بعض المعلومات الضرورية الخاصة بمقومات الدائرة الكهربية البسيطة.



شكل (٢ — ١)

الينبوع الكهربي، فرق الضغط، هبوط الضغط: الينبوع الكهربي هو الجزء من الدائرة الكهربية الذي يعمل على توفير الضغط الكهربي المسبب لمرور التيار، وهو الذي يحول الطاقة من أحد أشكالها المختلفة (كيميائية، ميكانيكية، حرارية) إلى طاقة كهربية يحملها التيار الكهربي إلى أجزاء الدائرة المختلفة. وقد يكون الينبوع الكهربي على شكل بطارية مكونة من أعمدة كهربية (تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربية)، أو من مولد كهربي (تحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربية) أو ازدواج حراري (تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة كهربية). ويمثل الينبوع الكهربي في حالة التيار المستمر بطرفين، يرمز لأحدهما بالعلامة السالبة (—)، ويعتبر ضغطه صفراً، ويرمز للآخر بالعلامة الموجبة (+)، ويعتبر ضغطه مساوياً للقوة الدافعة الكهربية للينبوع. ويكون مرور التيار في الدائرة الخارجية من الطرف عالي إلى الطرف منخفض الضغط، كما أن مروره داخل الينبوع الكهربي (لكي يكمل المسار الدائري) يكون بالعكس من الطرف منخفض إلى الطرف عالي الضغط. ويمكن تمثيل الينبوع الكهربي، مع أخذ تأثير مقاومته الداخلية في الحسبان، كما هو مبين في شكل (1– 1). ويلاحظ أنه يمكننا في هذه الحالة اعتبار أن الضغط الكهربي يرتفع بفضل الينبوع، من النقطة N (الطرف السالب) إلى النقطة P (الطرف الموجب) من الصفر إلى القيمة E، ثم يعود الضغط فينخفض، ابتداءاً من النقطة P، في خلال المقاومة الداخلية للينبوع Ri، ومقاومة الدائرة الخارجية R_e، من القيمة E حتى يصبح صفراً مرة أخرى عند النقطة N، ويقال في هذه الحالة أنه حدث هبوط للضغط في المقاومة الخارجية R_e ويكون هبوط الضغط الكلي في الدائرة مساوياً لضغط الينبوع ومضاداً له في الاتجاه، مما يؤدي إلى حدوث التوازن في الدائرة ومرور تيار ثابت القيمة. يتضح من ذلك أن قيمة هبوط الضغط في المقاومة الخارجية R_e في شكل (1– 2) هو V أو IR_e، فإذا اعتبرنا أن الضغط الخارجي V موجباً يكون الهبوط في الضغط سالباً أي $V - IRe$ –. بهذا يمكن اعتبار الهبوط في الضغط قوة دافعة كبيرة مضادة تظهر على طرفي المقاومة كرد فعل لمرور التيار الكهربي فيها.

قوانين المقاومات: عند مرور التيار في الدائرة الكهربية يلقى مقاومة معينة في كل جزء من أجزائها، وتتوقف قيمة هذه المقاومة على طبيعة الجهاز الذي يمثله هذا الجزء. ويكون مرور التيار في الأجهزة الكهربية عادة في أسلاك النحاس أو الألمنيوم، ويمكن حساب مقاومة هذه الأسلاك بمعرفة طولها ومساحة مقطعها ومقاومتها النوعية من القانون:

$$R = \frac{Sl}{a} \quad ....(1-4)$$

حيث R هي المقاومة بالأوم، l طول السلك بالمتر، a مساحة مقطع السلك بالمليمتر المربع، s هي المقاومة النوعية بالأوم ملليمتر مربع لكل متر، وهذه هي عبارة عن مقاومة سلك من المادة طوله متر واحد ومساحة مقطعه ملليمتر مربع.

قيمة s للنحاس عند درجة 20°م هي: $\frac{1}{75}$ أوم مم^2/م، تقريبًا.

تتأثر المقاومة بالحرارة، فتزداد قيمتها بازدياد درجة الحرارة، ويمكن الحصول على قيمة المقاومة R_t عند درجة حرارة معينة t درجة مئوية بدلالة المقاومة عند درجة الصفر R_0 من القانون:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad ....(1-5)$$

حيث α هو معامل ازدياد المقاومة بالأوم لكل درجة مئوية، وتبلغ قيمته بالنسبة للنحاس $\frac{1}{237}$. كذلك يمكن الحصول على المقاومة R_{t2} عند درجة الحرارة $t2$ بدلالة R_{t1} وهي المقاومة عند درجة الحرارة $t1$ بتطبيق المعادلة (1–5) في الحالتين فتنتج المعادلة:

$$\frac{R_{t_2}}{R_{t_1}} = \frac{237 + t_2}{237 + t_1}$$

أو

$$Rt_2 = Rt_1 \left(\frac{237 + t_2}{237 + t_1} \right) \qquad \text{(1-6)}$$

عند توصيل عدة مقاومات، $R_1, R_2, R_3 \ldots$، على التوالي معاً تكون المقاومة الكلية المكافئة R_{eq} هي عبارة عن مجموع المقاومات معاً، أي أن:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots\ldots \qquad \text{(1-7)}$$

عند توصيل عدة مقاومات $R_1, R_2, R_3 \ldots$، على التوازي معاً يمكن الحصول على قيمة المقاومة الكلية المكافئة R_{eq} من المعادلة:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots\ldots \qquad (1-8)$$

الدائرة الكهربية المركبة:

يستخدم قانون أوم عادة في حل الدوائر البسيطة، وهي الدوائر التي تحتوي على ينبوع كهربي واحد، ويمكن اختزالها في النهاية إلى الدائرة المبينة في الشكل (2 –1). أما في حالة الدوائر المركبة، وهي التي تتكون من مجموعة من الدوائر البسيطة شكل (5– 1)، (8– 1)، وتحتوي في العادة على أكثر من ينبوع كهربي واحد، فتستخدم عدة قوانين، أهمها:

أولاً: قانونا كيرشوف:-

القانون الأول: يكون المجموع الجبري لمقادير القوى الدافعة الكهربية للينابيع المختلفة في دائرة كهربية مقفلة، مع مجموع مقادير الهبوط في الضغط في مقاومات الدائرة المختلفة مساوياً للصفر. وذلك مع اعتبار أن الهبوط في الضغط على أية مقاومة يكافئ قوة دافعة كهربية مضادة ذات اتجاه موجب يضاد اتجاه التيار المار في المقاومة.

ولتوضيح تطبيق هذا القانون بدون الوقوع في بعض الأخطاء الشائعة نفرض أن الشكل (3 – 1) يمثل إحدى الدوائر المقفلة التي تتكون منها دائرة كهربية مركبة، والتي يراد تطبيق القانون عليها. نفرض أن اتجاه التيارات في الفروع المختلفة كما هو مبين في الشكل ونبدأ بتطبيق قانون كيرشوف الأول من نقطة معينة (ولتكن النقطة1). على حسب قانون كيرشوف الأول يجب أن يكون مجموع القوى الدافعة الكهربية ومجموع مقادير الهبوط في

شكل (٣-١)

الضغط في مقاومات الدائرة المختلفة مساوياً للصفر ابتداء من النقطة 1 حتى تعود إليها في أي الاتجاهين 1 4 3 2 أو 1 2 3 4 أي أن:

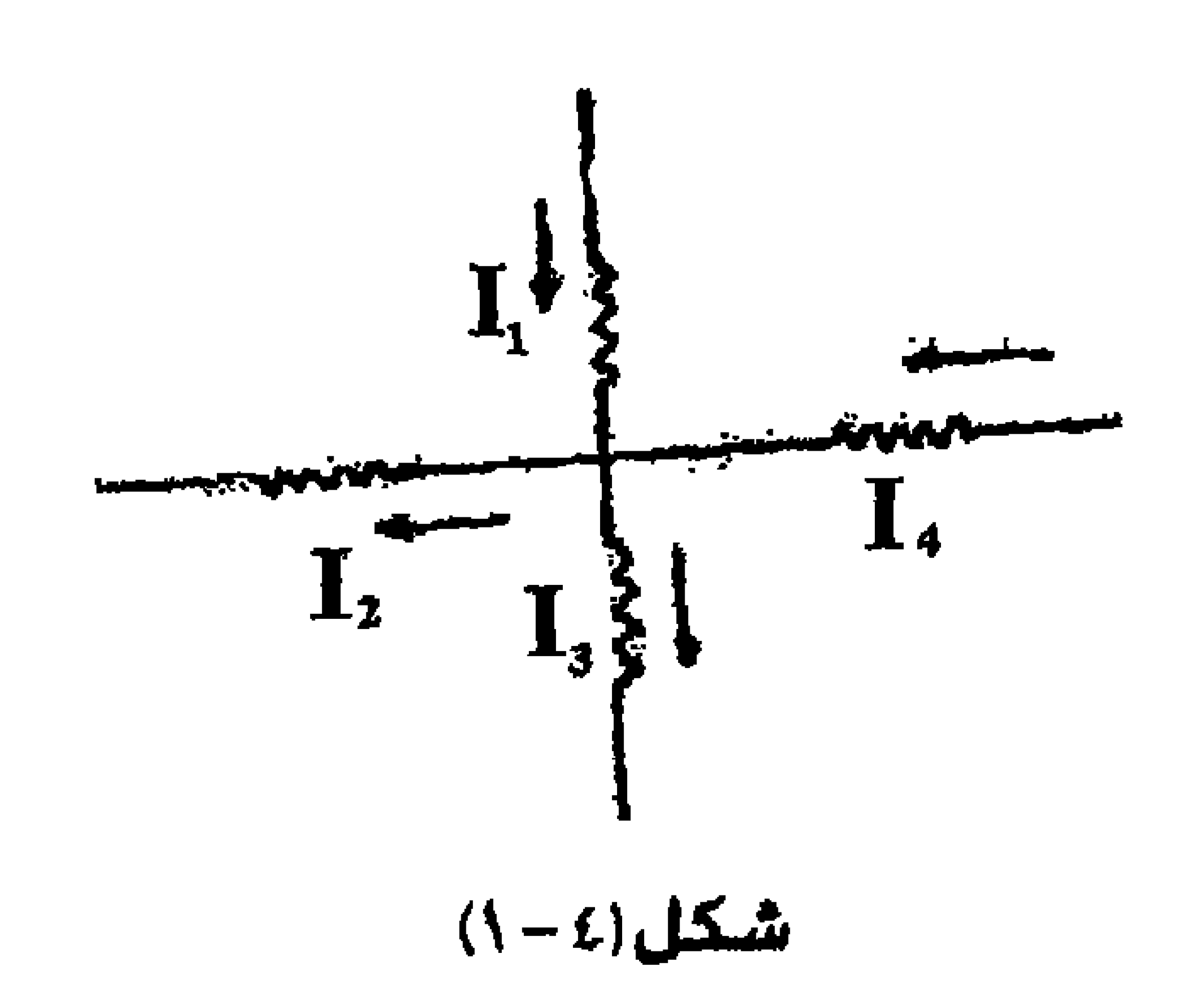
$$-I_1R_1 - E_1 + E_4 + I_4R_4 + E_3 + I_3R_3 - E_2 + I_2R_2 = 0$$

أو

$$-I_2R_2 + E_2 - I_3R_3 - E_3 - I_4R_4 - E_4 + E_1 + I_1R_1 = 0 \qquad (١-٩)$$

يلاحظ من المعادلتين السابقتين أن القوة الدافعة الكهربية للبطارية تدخل في المعادلة بإشارة موجبة عندما يكون المرور عليها أثناء تطبيق القانون من القطب السالب إلى القطب الموجب، وذلك لأن الضغط في الدائرة يرتفع بمقدار القوة الدافعة الكهربية في هذا الاتجاه، كما أن مقدار الهبوط في الضغط على المقاومة يدخل في المعادلة بإشارة سالبة عندما يكون المرور على المقاومة أثناء تطبيق القانون في اتجاه مرور التيار، وذلك لأن الضغط ينخفض في الدائرة بمقدار الهبوط في الضغط على المقاومة IR في هذا الاتجاه. والعكس صحيح في الحالتين.

القانون الثاني: المجموع الجبري للتيارات في الفروع المختلفة للدائرة المركبة التي تتقابل عند نقطة واحد يساوي صفراً، شكل (4 – 1) فمثلاً إذا كانت التيارات التي تمر في بعض فروع الدائرة المركبة التي تتقابل عند نقطة واحدة، كما هو مبين في الشكل (4 – 1).



شكل(٤ – ١)

فإن قانون كيرشوف الثاني ينص على أن:

$$\left.\begin{aligned} I_1 - I_2 - I_3 + I_4 &= 0 \\ \text{أو} \\ -I_1 + I_2 + I_3 - I_4 &= 0 \end{aligned}\right\} \quad (1-10)$$

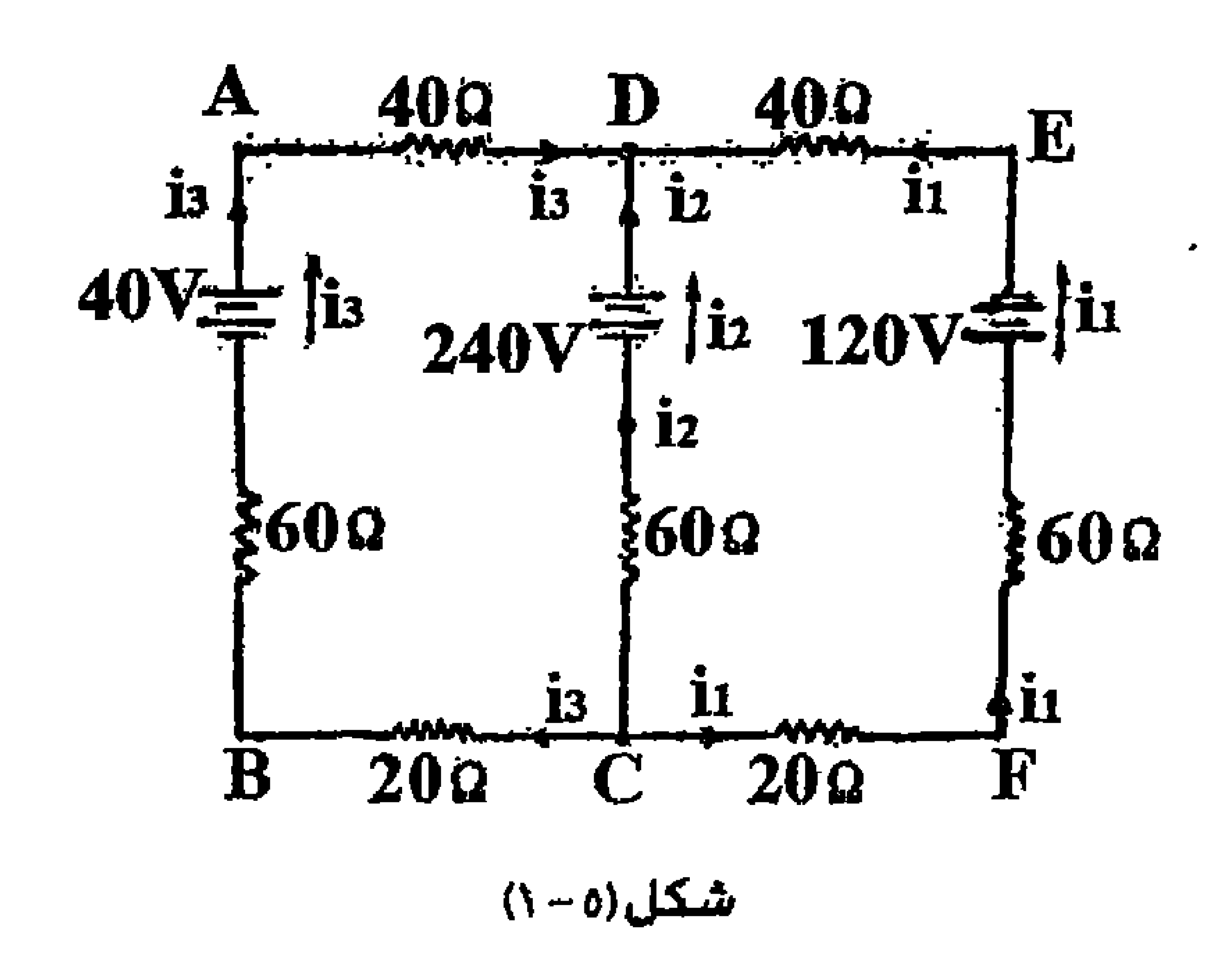
وذلك على أساس أنه عند اعتبار التيارات الداخلة نحو نقطة التجمع موجبة تعتبر التيارات الخارجة من نقطة التجمع سالبة، وبالعكس عند اعتبار التيارات الداخلة نحو نقطة التجمع سالبة تعتبر التيارات الخارجة من نقطة التجمع موجبة.

مثال

أوجد قيم التيار في كل بطارية من البطاريات المبينة في الشكل (5 – 1).

الحل: نفرض أن التيارات المارة في البطاريات الثلاث هي i_1, i_2, i_3، كما هو مبين في الشكل.

(**ملحوظة:** يكون فرض التيار في أي اتجاه، وعند الحصول على قيمة سالبة للتيار في النهاية فإن هذا معناه أن التيار فرض في الاتجاه الخاطئ وأن الاتجاه الصحيح هو الاتجاه المضاد).



شكل(٥ - ١)

بتطبيق قاعدة كيرشوف الأولى على الدائرتين ABCD ، CDEF.

أ. بالنسبة للدائرة ABCD، إذا بدأنا من النقطة A، ومررنا على الدائرة في الاتجاه ABCD، نحصل على المعادلة:

$$-40 + 60\,i_3 + 20\,i_3 - 60\,i_2 + 240 + 40\,i_3 = 0$$

باختصار هذه المعادلة نجد أن:

$$\left.\begin{aligned} 120\,i_3 - 60\,i_2 &= -200 \\ 6\,i_3 - 3\,i_2 &= -10 \end{aligned}\right\} \quad (1)\ldots\ldots\ldots\ldots$$

ملحوظة: إذا بدأنا من النقطة A ومررنا على الدائرة في الاتجاه ADCB نحصل على المعادلة:

$$-40 - 240 + 60\,i_2 - 20\,i_3 - 60\,i_3 + 40 = 0$$

وهي نفس المعادلة السابقة التي حصلنا عليها في المرة السابقة بعد ضرب طرفيها في -1، وباختصار نحصل على نفس النتيجة التي حصلنا عليها في المعادلتين (1).

بالنسبة للدارة CDEF، إذا بدأنا من النقطة C، ومررنا على الدائرة في الاتجاه CDEF نحصل على المعادلة:

$$-60\,i_2 + 240 + 40\,i_1 + 120 + 60\,i_1 + 20\,i_1 = 0$$

باختصار هذه المعادلة نجد أن:

$$(2)\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \begin{cases} 60\,i_2 - 120\,i_1 = 360 \\ i_2 - 2\,i_1 = 6 \end{cases}$$

بتطبيق قاعدة كيرشوف الثانية على النقطة D يمكن الحصول على معادلة ثالثة في المجاهيل الثلاثة $i1,\ i_2,\ i_3$، بحيث يمكن الحصول على قيمة كل منها بحل المعادلات الثلاث.

$$(3)\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \begin{cases} i_1 + i_2 + i_3 = 0 \\ i_2 + i_3 = -i_1 \end{cases}$$

بالتعويض في المعادلة (2) من المعادلة (3) نحصل على:

$$(4)\ldots\ldots\ldots\ldots\ 2\,i_3 + 3\,i_2 = 6$$

بجمع المعادلتين (1)، (4):

$$\begin{array}{lrl} (1) & 6\,i_3 - 3\,i_2 = & -10 \\ (4) & 2\,i_3 + 3\,i_2 = & 6 \\ \hline & 8\,i_3 = & -4 \\ & i_3 = & -\frac{1}{2} \end{array}$$

أي أن $\frac{1}{2}$ قيمة i_3 هي أمبير واتجاهه الصحيح من A إلى B وذلك على عكس الاتجاه المفروض من B إلى A. بالتعويض عن قيمة i_3، التي حصلنا عليها، من المعادلة (1) نحصل على قيمة قيمة i_2 كما يأتي:

$$6 \times -\frac{1}{2} - 3\, i_2 = -10$$

$$-3\, i_2 = -7$$

$$i_2 = 2\,\frac{1}{3}$$

أي أن قيمة i_2 هي $2\frac{1}{3}$ أمبير واتجاهه كما هو مفروض من C إلى D.

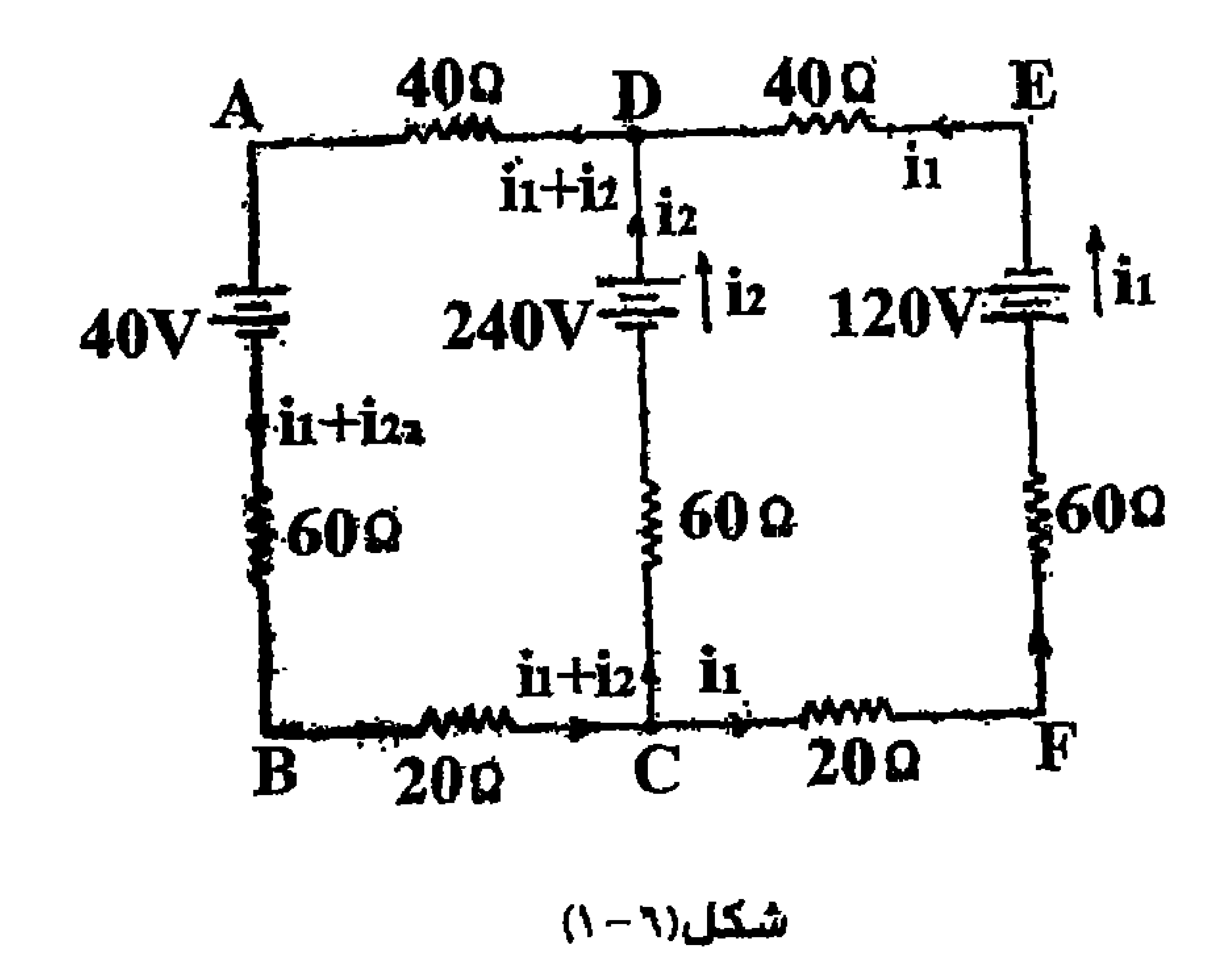
بالتعويض عن قيمة i_2، التي حصلنا عليها، في المعادلة (2) نحصل على قيمة i_1 كما يأتي:

$$2\frac{1}{3} - 2\, i_1 = 6$$

$$\therefore\ i_1 = -\frac{11}{6} = -1\,\frac{5}{6}$$

أي أن قيمة $i1$ هي $\frac{5}{6}$ 1– أمبير واتجاهه الصحيح من E إلى F، وذلك على عكس الاتجاه المفروض من F إلى E.

ملحوظة: يمكن تبسيط الحل السابق، وذلك بتطبيق قاعدة كيرشوف الثانية على الرسم مباشرة عند فرض اتجاهات التيارات في بادئ الأمر، فبدلاً من أن نفرض تياراً جديداً i_3، بعد أن فرضنا التيارين i_2 , i_1 نضع التيار المار في الفرع AD بدلالة التيارين i_2، i_1 كما هو مبين في شكل (6–1).



شكل(٦-١)

وعند تطبيق قاعدة كيرشوف على الدائرة ABCD نحصل على معادلة في i_1 , i_2 يمكن حلها مع المعادلة (2) الحصول على قيمة i_2 , i_1 مباشرة بالمرور على الدائرة من A إلى B إلى C إلى D ثم إلى A.

$$40 - 60\,(i_1+i_2) - 20\,(i_1+i_2) - 60\,i_2 + 240 - 40\,(i_1+i_2) = 0$$

ومنها $9\,i_2 + 6\,i_1 = 10$ ....(5)

لم يتغير أي شيء بالنسبة للدائرة CDEF، وتظل المعادلة (2) كما هي بدون تغيير.

بضرب المعادلة (2) في 3 وجمعها على المعادلة (5):

$$3\,i_2 - 6\,i_1 = 18$$

$$9\,i_2 + 6\,i_1 = 10$$

$$12\,i_2 = 28$$

$$i_2 = 2\,\frac{1}{3}$$

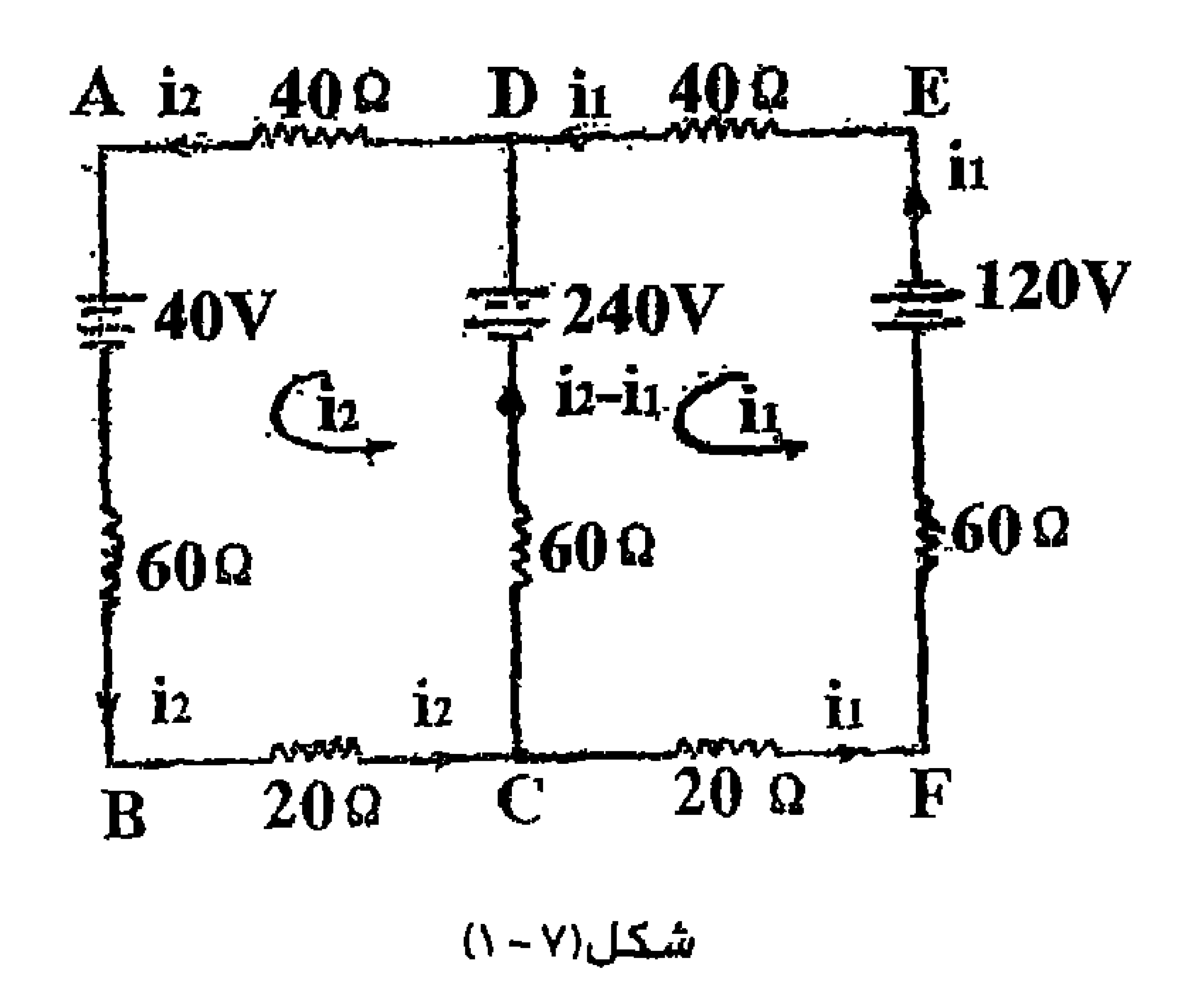
وبالتعويض عن هذه القيمة في المعادلة (2) نحصل على نفس i_1 بنفس الطريقة السابقة:

$$i1 = -1\ \frac{5}{6}$$

ويكون التيار المار في الفرع AB هو مجموع التيارين i_1 ,i_2 وذلك في الاتجاه المفروض على الرسم.

ثانيا: طريقة ماكسويل:-

هذه طريقة أخرى لاختصار الحل عن طريق الاستغناء عن المعادلة الناشئة عن تطبيق قاعدة كيرشوف الثانية، وذلك بعدم فرض تيارات جديدة في بعض الفروع ووضعها بدلالة التيارات المفروضة مباشرة، وهذا يؤدي إلى تقليل عدد المجاهيل، وبالتالي عدد المعادلات اللازمة للحصول على قيم هذه المجاهيل، مما يعمل على تبسيط الحل الرياضي في نهاية الأمر. ويمكن توضيح هذه الطريقة بحل المثال السابق بطريقة ماكسويل. نفرض في هذه الحالة أن كل دائرة من الدائرتين ABCD، CDEF تحتوي على تيار يدور فيها في اتجاه معين، وثابت الاتجاه بالنسبة للدائرتين (إما في اتجاه دوران عقربي الساعة، أو في عكس اتجاه دوران عقربي الساعة) شكل (7– 1).



شكل(٧ - ١)

بتطبيق قاعدة كيرشوف الأولى على كل من الدائرتين ABCD وCDEF.

أ. إبتداءاً من A والمرور على الدائرة ABCD في الاتجاه من A إلى B إلى C إلى D ثم إلى A نجد أن:

$$-40 - 60\, i_2 - 20\, i_2 - 60\, (i_2 - i_1) + 240 - 40\, i_2 = 0$$

$$(1)\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \begin{cases} 180\, i_2 - 60\, i_1 = 200 \\ 9\, i_2 - 3\, i_1 = 10 \end{cases}$$

ب. ابتداءاً من C والمرور على الدائرة CDEF في الاتجاه من C إلى D إلى E إلى F ثم C نجد ان:

$$-60\, (i_2 - i_1) + 240 + 40\, i_1 + 120 + 60\, i_1 + 20\, i_1 = 0$$

$$(2)\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \begin{cases} 60\, i_2 - 180\, i_1 = 360 \\ i_2 - 3\, i_1 = 6 \end{cases}$$

بطرح المعادلة (2) من المعادلة (1) نجد أن:

$$8\, i_2 = 4$$

$$i_2 = \frac{1}{2}$$

وبالتعويض بهذه القيمة في المعادلة (2) نجد أن:

$$3\, i_1 = -5\frac{1}{2}$$

$$i_1 = -1\frac{5}{6}$$

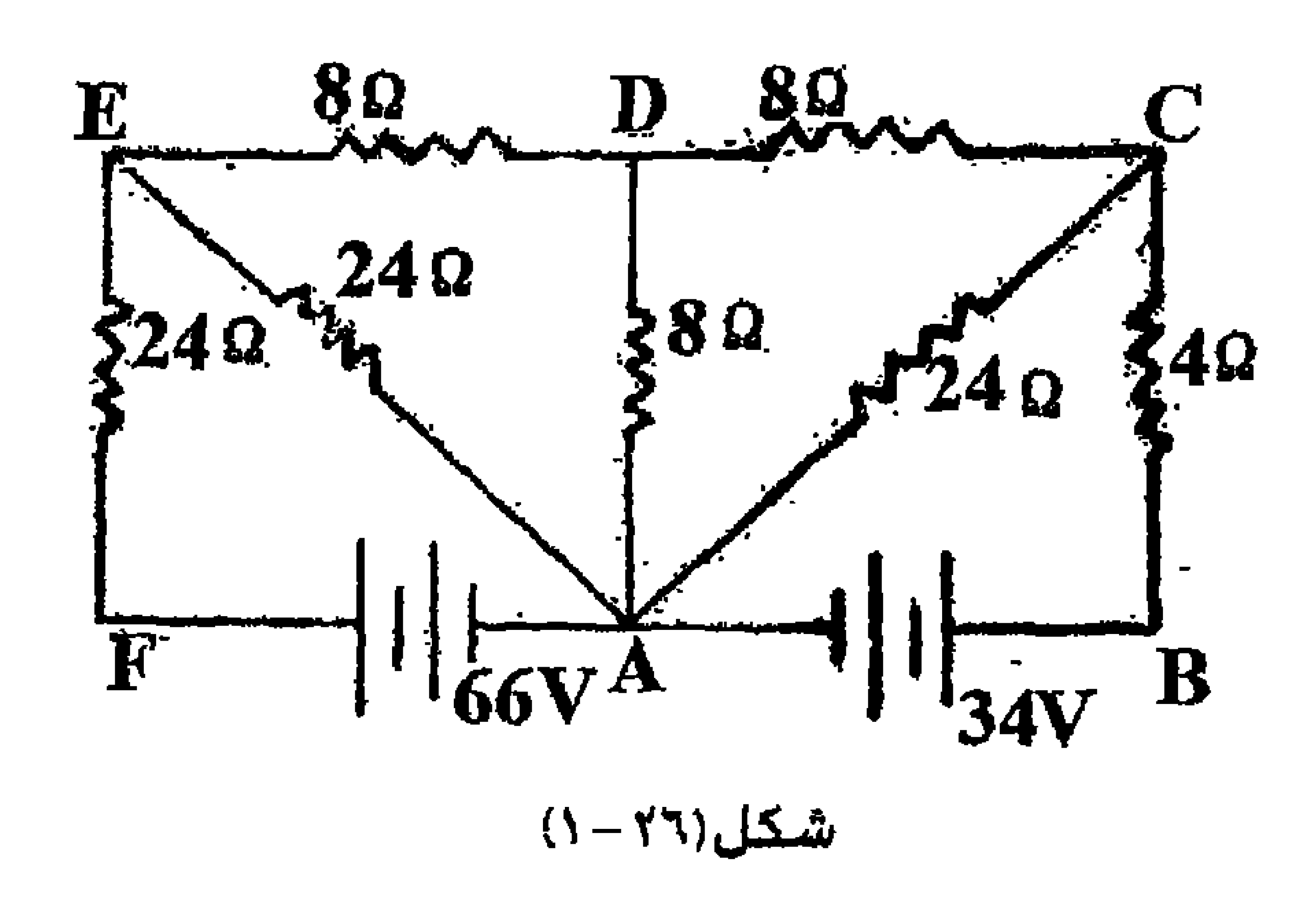
من هذا يتضح أن قيمة i_2 هي $\frac{1}{2}$ أمبير في الاتجاه المفروض وقيمة i_1 هي $1\frac{5}{6}$ في عكس الاتجاه المفروض. أما بالنسبة للتيار المار في الفرع CD فهو عبارة عن $(i_2 - i_1)$.

$$i_2 - i_1 = \frac{1}{2} - \left(-1\frac{5}{6}\right) = \frac{1}{2} + \frac{11}{6} = 2\frac{1}{3}$$

أي أن قيمة التيار في الفرع CD هي $2\frac{1}{3}$ أمبير، واتجاهه كما هو مفروض من C إلى D وبذلك نكون قد حصلنا على نفس النتائج التي حصلنا عليها في الحل بالطريقتين السابقتين.

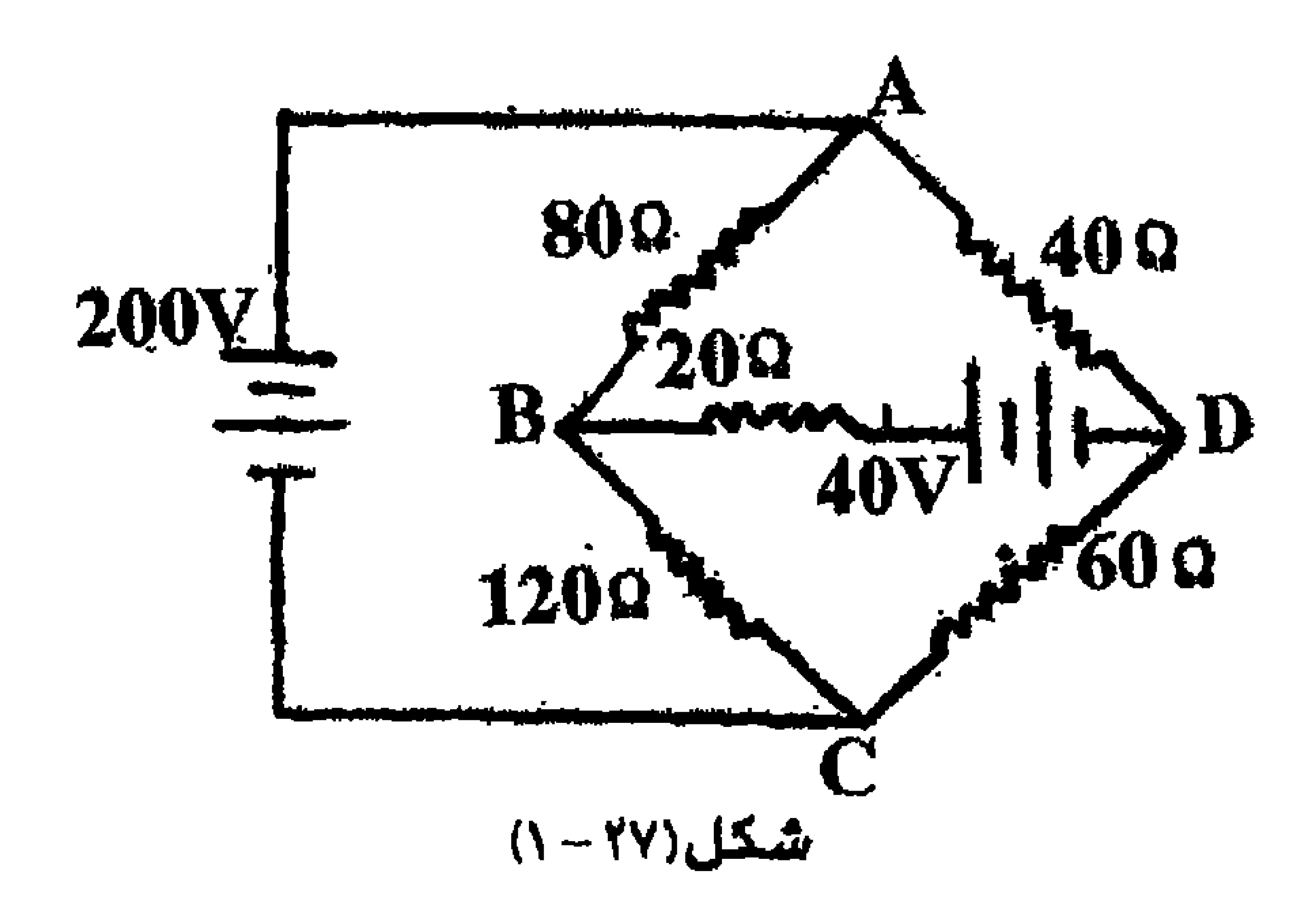
ملحوظة: يحسن فرض التيارات في الدوائر المختلفة في نفس الاتجاه، أي إما في اتجاه دوران عقربي الساعة، أو في عكس اتجاه دوران عقربي الساعة، فإن هذا يعمل على تسهيل وضع المعادلات للدوائر المختلفة.

1. أوجد مقدار واتجاه التيار في الفرع BC في شكل (26–1).



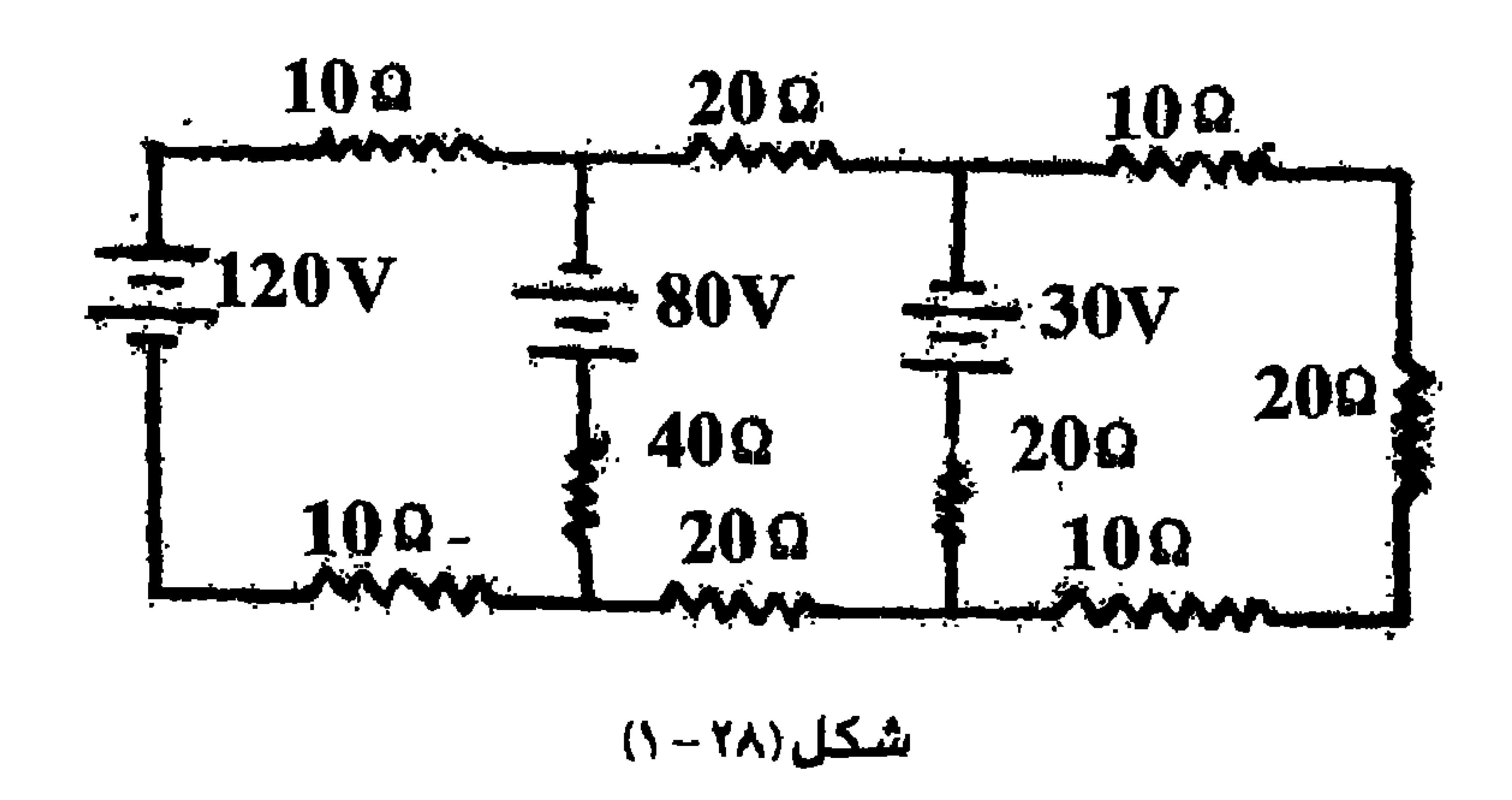
شكل (٢٦ – ١)

2. أوجد مقدار واتجاه التيار في الفرع BD في شكل (27–1).



شكل(٢٧ - ١)

3. أوجد مقاديرواتجاهات التيارات في البطاريات المختلفة في شكل (28–1).



شكل(٢٨ - ١)

الفصل الثاني

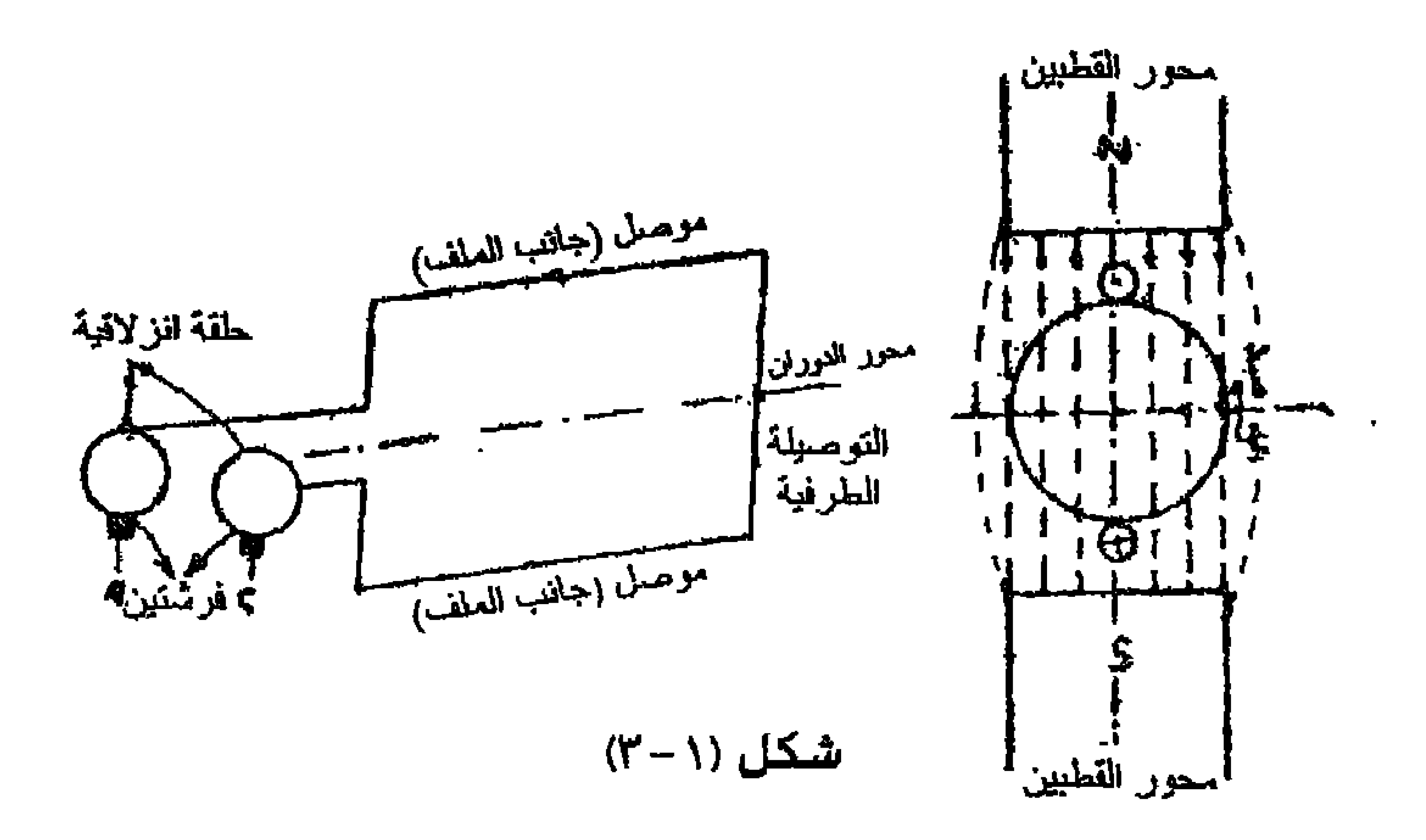
نظريات التيار المتردد

نظريات التيار المتردد

ملف المولد:

يبين شكل (1– 3) ملف المولد، وهو يتكون من جانبين وهما عبارة عن لموصلين موضوعين على استطوانة من الحديد (يرقد كل منهما في مجرى بالاسطوانة وليس على السطح كما هو مبين بالشكل للسهولة)، ويتصل الموصلان من الناحية الخلفية معاً بتوصيلة يطلق عليها اسم التوصيلة الطرفية، كما يتصل كل منهما من الناحية الأمامية بحلقة انزلاقية تدور معه حول نفس المحور الذي تدور حوله الاسطوانة الحديدية. وتوجد فرشتان من الكربون ثابتتان في الفضاء وتلامس كل منهما مع حلقة انزلاقية، بحيث يمكن الحصول على القوة الدافعة الكهربية التي تتولد في الملف بين الطرفين A و B الخارجين من الفرشتين. ويلاحظ أن المسافة بين الموصلين على سطح الاسطوانة الحديدية هي عبارة عن خطوة قطبية، أو تكون أقرب ما يمكن للخطوة القطبية (المسافة بين محوري القطبين)، وذلك حتى تكون القوة الدافعة الكهربية التي نحصل عليها أكبر ما يمكن.

هذا ويمكن أن يتكون كل جانب من جانبي الملف عن موصل واحد، وذلك إذا كان الملف يحتوي على لفة واحدة، كما أن جانب الملف يتكون من عدة موصلات وذلك إذا كان الملف يحتوي على أكثر من لفة واحدة.



شكل (١ – ٣)

القوة الدافعة الكهربية التي تتولد في ملف المولد:

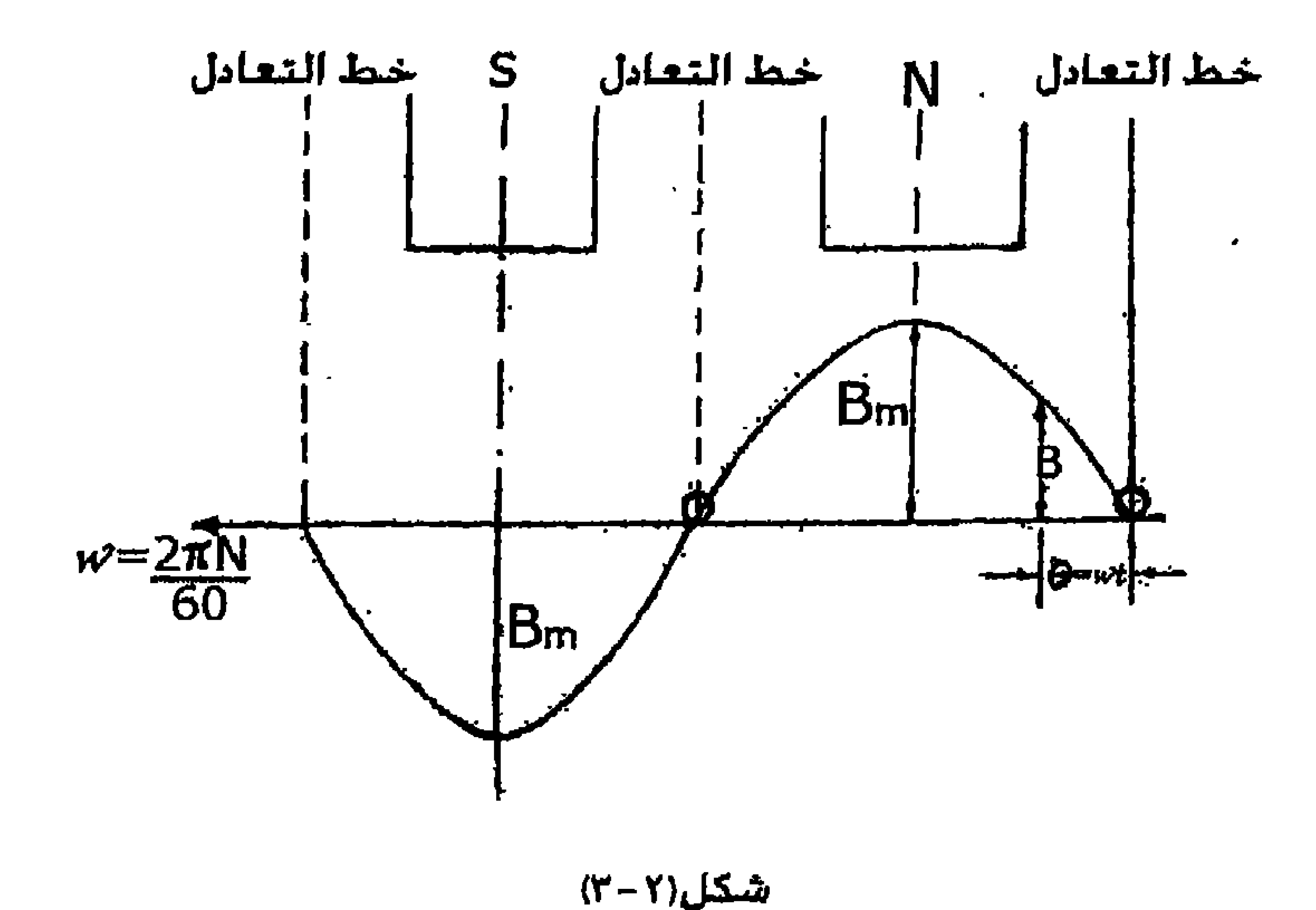
عند دوران الاسطوانة الحديدية الحاملة للملف (ويطلق عليها اسم المنتج في الآلات الكهربية) تتولد في كل من جانبي الملف قوة دافعة كهربية ديناميكياً، تكون قيمتها على حسب المعادلة (36– 2) هي:

$$e = Blv \times 10^{-8}$$ فولت

وتكون قيمة القوة الدافعة الكهربية التي نأخذها بين الطرفين C, A هي ضعف هذه القيمة، لأنها تنتج من موصلين، وإذا كان عدد اللفات في الملف n فإن القيمة الناتجة تكون عبارة عن:

$$e = 2n\,Blv \times 10^{-8}$$ فولت

تتوقف قيمة القوة الدافعة الكهربية التي تتولد في الملف إذا على كثافة الفيض المغناطيسي الذي يقطعه كل من جانبي الملف عندما يتحرك بالسرعة V، وهي السرعة المحيطة للمنتج. والفيض الذي يعنينا في هذه الحالة هو الفيض الموجود في الثغرة الهوائية بين سطح المنتج ووجه القطب المقابل له. وسواء كان هذا الفيض ناشئاً عن مغناطيس دائم، أو عن مغناطيس كهربي يستخدم فيه التيار المستمر (كما هو الحال في الآلات الكهربية)، فإن كثافته لا تتغير مع الزمن، وإنما يكون لها توزيع فراغي معين بين خطي التعادل الواقع بينهما كل قطب. فتكون قيمتها صفراً عند خط التعادل، وتزداد حتى تصل إلى النهاية العظمى عند محور القطب. ويمكن تعديل التوزيع الفراغي لكثافة الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية بتعديل أبعادها، ويراعى في الآلات الكهربية أن يؤدي ذلك إلى إعطاء توزيع فراغي لكثافة الفيض في الثغرة الهوائية على شكل منحنى جيبي، كما هو مبين في شكل (2– 3).



شكل(٢ - ٣)

إذا كانت السرعة المحيطة للمنتج V ثابتة (بأن تكون سرعة دوران المنتج N لفة في الدقيقة ثابتة $V = \frac{\pi\ ND}{60}$، حيث D هو قطر المنتج بالسنتميترات). فإن قيمة e تتغير من لحظة إلى أخرى أثناء دوران المنتج، وذلك نتيجة للتوزيع الفراغي المتغير لكثافة الخطوط المغناطيسية B. فإذا اتخذنا نقطة بدء بالنسبة للزمن (صفر = t) عندما يمر أحد الموصلين بخط التعادل 1 والموصل الثاني بخط التعادل 2، فإن قيمة القوة الدافعة الكهربية التي تتولد في الملف وتظهر بين الطرفين A , C عند أية لحظة بعد ذلك تتوقف على قيمة كثافة الخطوط المغناطيسية في الثغرة الهوائية التي يمر بها جانباً الملف في هذه اللحظة. ونظراً لأن المنتج يدور بسرعة ثابتة فإنه يمكن تحديد قيمة كثافة الخطوط المغناطيسية التي يمر بها جانبي الملف في اللحظة t ثانية بعد البدء بدلالة Bm، وهي النهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسية عند محور القطب، وبدلالة سرعة دوران المنتج على أساس التوزيع الجيبي لكثافة الخطوط المغناطيسية، وذلك على النحو الآتي:

إذا كانت N هي سرعة دوران المنتج باللفة في الدقيقة، فإن السرعة الزاوية للمنتج W تصبح:

$$w = 2\pi \frac{N}{60} \quad \text{(3 –1)}$$ زاوية نصف قطرية/ثانية

وتكون الزاوية التي يقطعها كل من جانبي الملف في الزمن t ثانية هي wt بالتقدير نصف القطري، فإذا رمزنا لهذه الزاوية بالرمز θ ، فإن قيمة كثافة الخطوط المغناطيسية التي يقطعها كل من جانبي الملف عند اللحظة t هي:

$$B = Bm \sin \theta$$

$$= Bm \sin wt$$

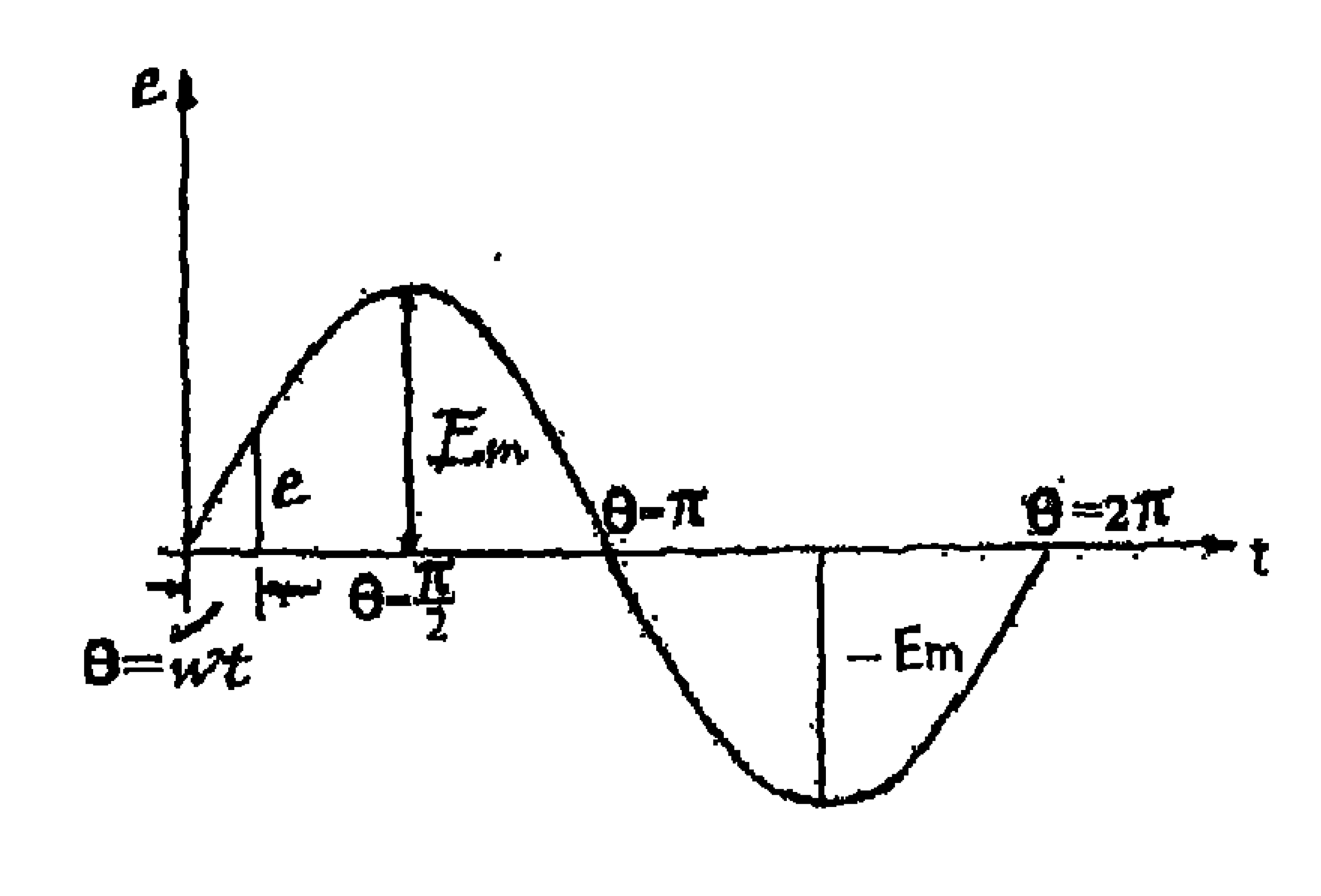
ومن ثم فإن قيمة القوة الدافعة الكهربية التي تحصل عليها بين الطرفين C, A تصبح:

$$e = 2n B_m l v \times 10^{-8} \sin \omega t \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3-2)$$

أي أن قيمة القوة الدافعة الكهربية تتغير مع الزمن على شكل دالة جيبية، ويكون هذا التغيير ناشئاً عن التوزيع الفراغي المتغير (على شكل دالة جيبية أيضاً) لكثافة الخطوط المغناطيسية في الثغرة الهوائية للآلة. تكون قيمة e أكبر ما يمكن، أي تبلغ نهايتها العظمى، عندما تكون $\sin wt = 1$، أي عندما تكون $wt = \frac{\pi}{2}$.
ويرمز لها بالرمز Em.

$$E_m = 2n B_m l v \times 10^{-8} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3-3)$$

$$e = E_m \sin \omega t \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3-4)$$



شكل(٣-٣)

يبين شكل (3 – 3) المنحنى الذي يربط قيمة e مع الزمن، وهو منحنى جيبي ذو اتساع مقداره Em.

التردد:

يقال للقوة الدافعة الكهربية التي نحصل عليها بين الطرفين C, A أنها مترددة، أي أن قيمتها تتغير بصفة دورية منتظمة مع الزمن، بحيث تمر كل دورة بنفس التغيرات التي مرت بها في الدورة السابقة. ويتضح بمراجعة الشكل (2 – 3) أن الدورة الواحدة تتم عندما يقطع كل من جانبي الملف خطوتين قطبيتين كاملتين. فإذا كان 2p هو عدد الأقطاب في الآلة يكون عدد الدورات التي تمر بها القوة الدافعة الكهربية المتولدة في اللفة الواحدة هي p ويكون عدد الدورات في الثانية f هو:

عدد الدورات في اللفة الواحدة × عدد اللفات في الثانية = f

$$f = p\ \frac{N}{60}$$ دورة / ثانية

تستبدل كلمة دورة في بعض الأحيان بكلمة ذبذبة، وفي كلتا الحالتين يعرف التردد f بأنه عدد الدورات أو عدد الذبذبات التي تحدث في الثانية، كما تعرف الفترة بأنها الزمن بالثانية الذي تستغرقه الدورة أو الذبذبة الواحدة، ويرمز لها بالرمز T، وبذلك تكون قيمة T بدلالة f هي:

$$T = \frac{1}{f}$$ ثانية

الدرجات الكهربية والدرجات الميكانيكية:

إذا كان عدد الأقطاب في الآلة الكهربية 2p، فإنها تكون موزعة على محيط دائرة بحيث تشغل عدداً من الدرجات 360 أو بمعنى آخر فإن الأقطاب تشغل على

الآلة زاوية مقدارها 2π بالتقدير نصف القطري وتكون قيمة الزاوية التي تغطيها الخطوة القطبية هي $\frac{2\pi}{2p}=\frac{\pi}{p}$ بالتقدير النصف القطري أيضاً.

ولكن انتقال الموصل مسافة مقدارها خطوة قطبية تجعله يتعرض لتغيير في القوة الدافعة الكهربية المتولدة فيه يناظر نصف دورة كاملة ويعطى هذا التغيير زاوية مقدارها π على منحنى القوة الدافعة الكهربية المبينة في شكل (4– 3). وهذا يعني أن الحركة الميكانيكية التي تغطي زاوية مقدارها $\frac{\pi}{p}$ بالتقدير نصف القطري تعطي تغييراً مناظراً في الدائرة الكهربية يغطي زاوية مقدارها π بالتقدير نصف القطري تعطى أيضاً. ومن هنا يجب التفريق بين قيم الزوايا التي تقاس بها الحركة الميكانيكية على الآلة نفسها، والتي يطلق عليها اسم الزوايا الميكانيكية، وبين الزوايا المناظرة التي يمتد عليها التغيير المناظر في الدائرة الكهربية والتي يطلق عليها الزوايا الكهربية. ويتضح مما سبق أنه إذا كانت α_m هي قيمة الزاوية الميكانيكية، و α_e هي قيمة الزاوية الكهربية المناظرة فإن العلاقة بينهما هي:

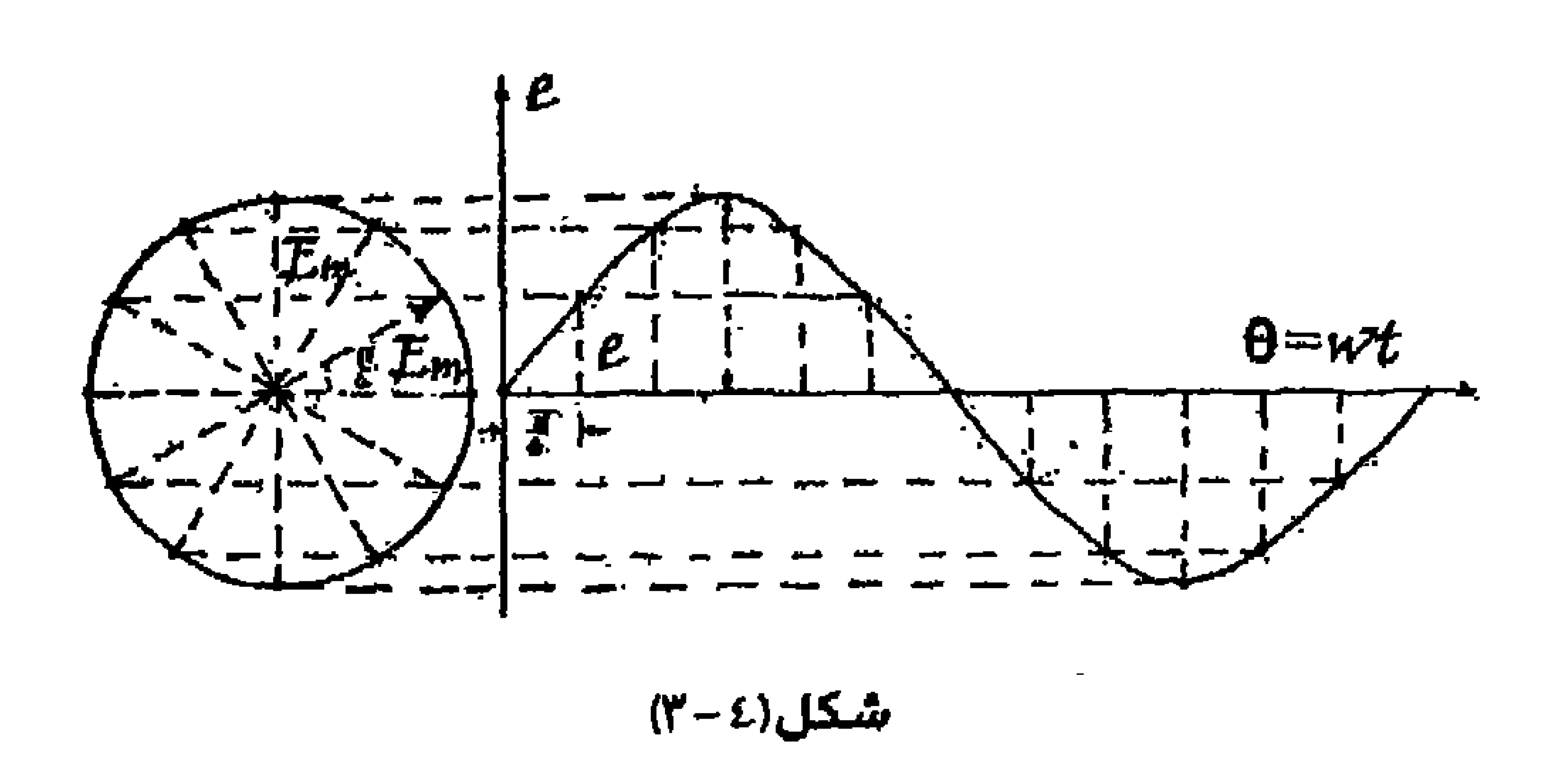
$$\alpha_e = p\alpha_m \quad \text{............... (3 – 5)}$$

إن W التي حصلنا عليها في المعادلة (1– 3) هي السرعو الزاوية على أساس الزوايا الميكانيكية، أما W في المعادلة (4 – 3) فيجب أن تكون على أساس الزوايا الكهربية. والمعادلة (1– 3) تعطي W على أساس الزوايا الكهربية أيضاً لأن $p=1$، أما إذا كان عدد الأقطاب أكثر من اثنين، ويساوي $2p$، فيجب مراعاة ان قيمة W هي في الواقع:

$$\omega = 2\pi\,\frac{pN}{60} = 2\pi f \quad \text{............... (3 – 6)}$$

تمثيل القوة الدافعة الكهربية المترددة:

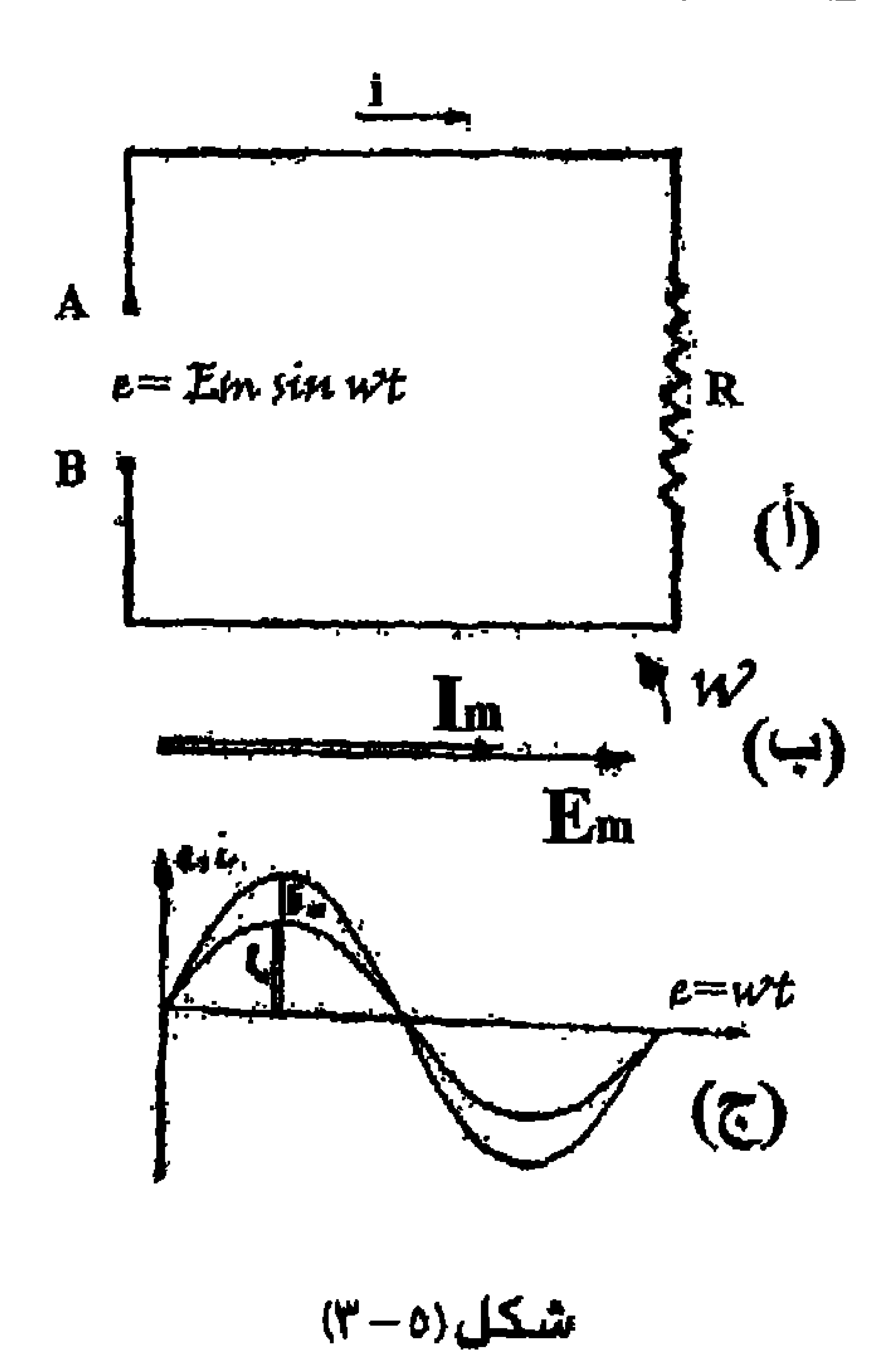
يمكن تمثيل القوة الدافعة الكهربية المترددة التي حصلنا عليها في المعادلة (4- 3) على المحاور الكرتيزية كما في شكل (3 – 3)، ويكفي في هذه الحالة رسم دورة واحدة، أو دورتين على حسب الأحوال. كذلك يمكن تمثيل نفس القوة الدافعة الكهربية بمتجه، طوله يساوي E_m بمقياس رسم معين، على أن يكون مفهوماً أن هذا المتجه يدور بالسرعة الزاوية W، وأن القيمة اللحظية للقوة الدافعة الكهربية عند أية لحظة t، التي تناظر الزاوية $\theta = \omega t$ عبارة عن مسقط المتجه E_m على المحور الرأسي، وذلك بعد دورانه الزاوية θ عن محور البدء، وهو المحور الأفقي شكل (4 – 3). وتستخدم هذه الطريقة عادة في رسم المنحنى الجيبي على المحاور الكرتيزية باستخدام الدائرة شكل (4–3).



شكل(٤-٣)

القوة الدافعة الكهربية المترددة في دائرة تحتوي على مقاومة:

نفرض أننا وصلنا إلى الطرفين A،D دائرة تحتوي على مقاومة مقدارها R أوم، شكل (5 – 3أ). تكون قيمة التيار i المار في الدائرة عند أية لحظة t، على حسب قانون أوم، هي:



شكل(٥-٣)

$$i = \frac{e}{R} = \frac{E_m \sin \omega t}{R} = I_m \sin \omega t \quad \text{.....................} \quad (3-7)$$

$$I_m = \frac{E_m}{R} \quad \text{.....................} \quad (3-8)$$

حيث Im هي قيمة النهاية العظمى للتيار التي يصل إليها عندما تكون القوة الدافعة الكهربية عند نهايتها العظمى Em. ويلاحظ أن قيمة التيار تتناسب مع قيمة الضغط بمعامل ثابت هو $\frac{1}{R}$ ، ولذلك يكون منحنى التيار هو الآخر منحنى جيبي ينطبق في مراحله المختلفة مع منحنى الضغط، بمعنى أنهما يمران بنقطة الصفر معاً، كما أنهما يمران بقيمة النهاية العظمى في كل من الاتجاهين الموجب والسالب معاً. ويقال حينئذ إن الضغط والتيار في توافق مرحلي شكل (5 – 3ج).

عند تمثيل كل من الضغط والتيار بمتجه على نمط التمثيل المبين في شكل (5 – 3ب) نجد أن المتجهين ينطبقان معاً ويدوران بنفس السرعة الزاوية W. يبين شكل (5 – 3ب) المتجهين في لحظة معينة وهي لحظة الابتداء. ويطلق على

مثل هذا الشكل مخطط المتجهات، ويلاحظ أنه يمثل الضغط والتيار عند لحظة معينة، ويكون الغرض الأساسي منه بيان الاختلاف المرحلي بينهما.

إذا أردنا معرفة قيمة القدرة التي تأخذها الدائرة في هذه الحالة، يجب أن نراعي أنه نظراً لأن قيمتي الضغط والتيار تتغيران من لحظة لأخرى، فإن قيمة القدرة تتغير أيضاً من لحظة لأخرى، وتكون القيمة اللحظية للقدرة p عند أية لحظة t هي:

$$p = ei = i^2 R = I^2_m R \sin^2 \omega t$$

$$= \frac{E^2_m}{R} \sin^2 \omega t \quad \text{.................. (3 – 9)}$$

جول/ثانية أو وات

وهذا يعني أن معدل إنتاج الطاقة الحرارية في المقاومة يكون متغيراً، نظراً لتغير $p = i_2 R$. ولكن يمكن الحصول في خلال الفترة T على معدل متوسط لإنتاج الحرارة نستطيع مساواته بالمعدل الناشئ عن تيار مستمر مكافئ، وتكون قيمة هذا التيار المكافئ هي القيمة الفعالة للتيار. فإذا رمزنا لهذه القيمة بالرمز Ie نجد أن:

$$\text{(3 – 10) ....} \quad I^2_e \cdot R \cdot T = \int_0^T i^2 R \, dt$$

$$\text{(3 – 11) .....} \quad I^2_e = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 \, dt = \frac{I^2_m}{T\omega} \int_0^T \sin^2 \omega t \, d\omega t$$

$$= \frac{I^2_m}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2 \theta \, d\theta = \frac{I^2_m}{2\pi} \int_0^{2\pi} \tfrac{1}{2} (1 - \cos 2\theta) d\theta$$

$$= \frac{I^2_m}{2\pi} \times \tfrac{1}{2} \times 2\pi = \frac{I^2_m}{2}$$

$$\text{(3 – 12) ....} \quad I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

ولكن $\frac{I_m}{\sqrt{2}}$ هي قيمة جذر متوسط المربع للمنحنى الجيبي للتيار، وهذا يعني أن القيمة الفعالة للتيار تساوي قيمة جذر متوسط المربع كما يتضح من المعادلة (12– 3).

$$I_e^2 = \frac{1}{T}\int_0^T i^2\,dt = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i^2\,d\theta$$

$$(3-13)\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad I_e = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i^2\,d\theta}$$

إن التعريف الذي تحدده المعادلة (13 –3) للتيار الفعال يسري على أي تيار متردد أو أية كمية مترددة سواءاً كان المنحنى الذي يمثله مع الزمن جيبي أو غير جيبي. ولذلك كثيراً ما يطلق على القيمة الفعالة اسم قيمة جذر متوسط المربع وتختصرعادة (ج.م.م.).

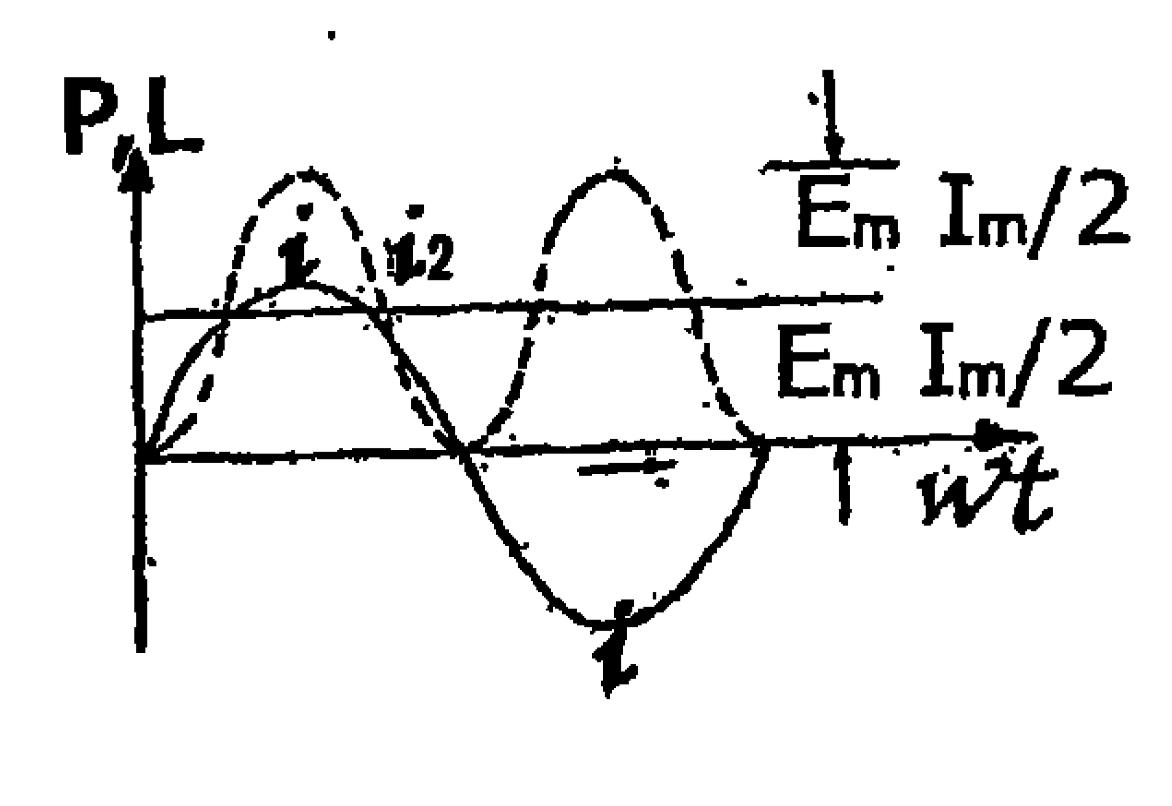
القدرة عند أية لحظة t هي:

$$p = ei = E_m I_m \sin^2 \omega t = \tfrac{1}{2} E_m I_m \,(1 - \cos 2\omega t)$$

$$= E_e I_e - E_e I_e \cos 2\omega t$$

$$(3-14)\ \ldots\ldots\ldots \quad = E\,I - E\,I\,\cos 2\omega t$$

حيث E هي القيمة الفعالة للضغط وتساوي قيمة جذر متوسط المربع أي $\frac{E_m}{\sqrt{2}}$ و I هي القيمة الفعالة للتيار. وسوف نستمر بعد ذلك في استعمال هذين الرمزين بدون دليل للإشارة إلى القيمة الفعالة لكل من الضغط والتيار. ويلاحظ أن قيمة القدرة اللحظية تتكون من حدين، حد ثابت وهو EI، وحد يتغير دورياً مع الزمن بضعف التردد العادي للضغط والتيار (2w بدلاً من w)، ويبين شكل (6 – 3) منحنى القدرة مع الزمن وكيفية تحليله إلى منحنيين،



شكل(٦-٣)

أحدهما خط مستقيم على بعد ثابت وهو $EI = \frac{E_m I_m}{2}$ من المحور الأفقي، والآخر منحنى ذو اتساع EI وتردده ضعف تردد الضغط والتيار. ولما كانت القيمة المتوسطة لهذا المنحنى تساوي صفراً، فإن القيمة المتوسطة للقدرة هي المقدار الثابت EI. وتكون القدرة التي نحصل عليها في الدائرة وهي القدرة الفعالة هي:

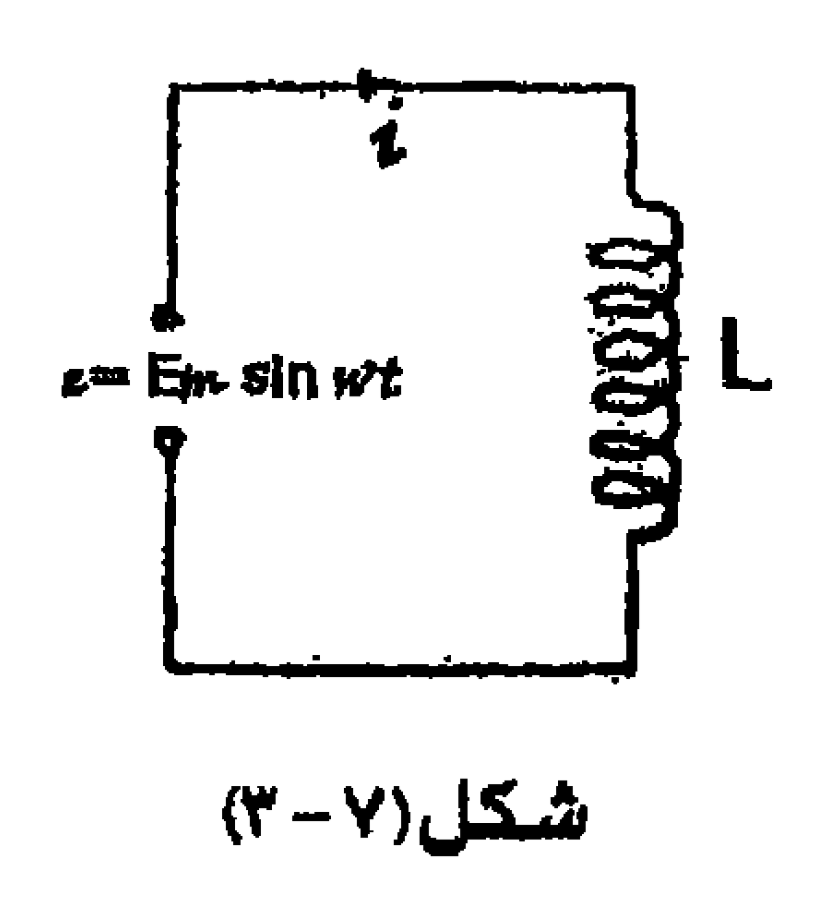
$$P = EI = I^2R = \frac{E^2}{R} \quad \text{وات}$$

حيث

$$E = IR \quad .... (3-15)$$

القوة الدافعة المترددة في دائرة تحتوي على ملف ذي حث ذاتي:

افرض أننا أوصلنا الطرفين $D,\ A$ إلى دائرة كهربية تحتوي على ملف ذي حث ذاتي مقداره L هنري، ومقاومته مهملة $(R=0)$، وافرض أن التيار الذي يمر في الدائرة عند أية لحظة t بفعل القوة الدافعة الكهربية المترددة هو i أمبير شكل (7 – 3). ينشأ عن مرور التيار i في الملف فيض مغناطيسي متردد ينتج قوة كهربية مضادة في الملف e_b تكون قيمتها:



شكل(٧ - ٣)

حسب المعادلة:

$$e_b = - L \frac{di}{dt}$$

بتطبيق قانون كيرشوف على الدائرة يجب أن يكون:

$$e + e_b = 0$$

$$\therefore \quad E_m \sin \omega t - L \frac{di}{dt} = 0$$

$$\therefore \quad E_m \sin \omega t = L \frac{di}{dt}$$

$$\therefore \quad \int di = \int \frac{E_m}{L} \sin \omega t \, dt$$

$$(3-16) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad \therefore \quad i = - \frac{E_m}{\omega L} \cos \omega t + C$$

سوف نعتبر أن ثابت التكامل C في المعادلة (16 -3) يساوي صفراً، وذلك لأنه يمثل جزء التيار الذي يظهر في حالة التلاشي ويتلاشى بسرعة تاركاً وراءه الجزء الدائم من التيار $\frac{E_m}{\omega L} \cos \omega t$ فقط.

$$\therefore \quad i = -\frac{E_m}{\omega L}\cos \omega t$$

$$i = -\frac{E_m}{\omega L}\sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right)$$

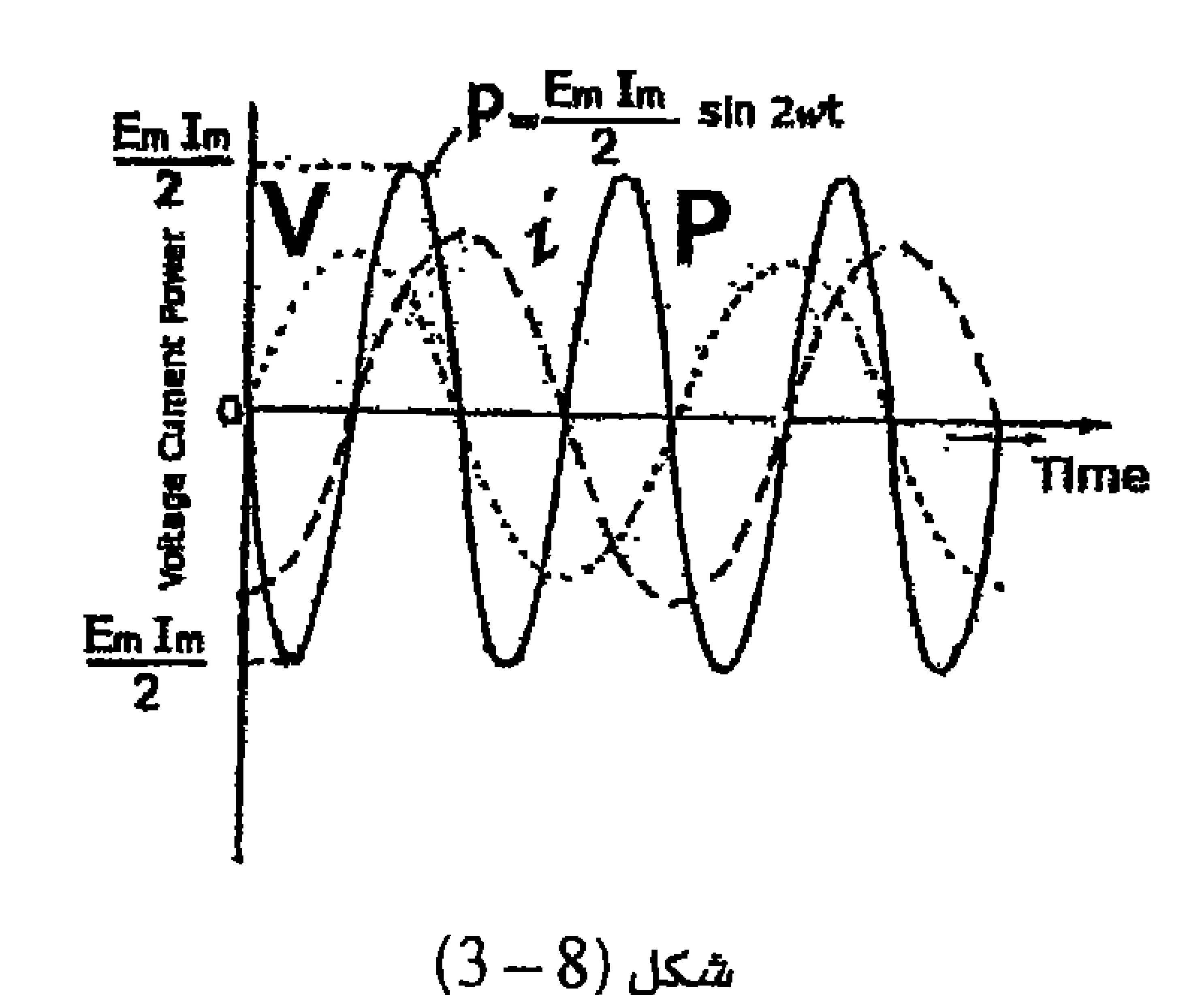
$$= \frac{E_m}{\omega L}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$i = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad \cdots\cdots\cdots \quad (٣-١٧)$$

حيث Im هي قيمة النهاية العظمى للتيار وهي تساوي $\frac{E_m}{\omega L}$، ويطلق على wL الممانعة الحثية للدائرة أو الملف وهي تقاس بالأوم عندما تكون L بالهنري. وإذا كانت القيمة الفعالة للتيار هـ $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ فإن القيمة الفعالة للقوة الدافعة الكهربية التي تلزم لتمرير التيار في الدائرة موضع البحث هي:

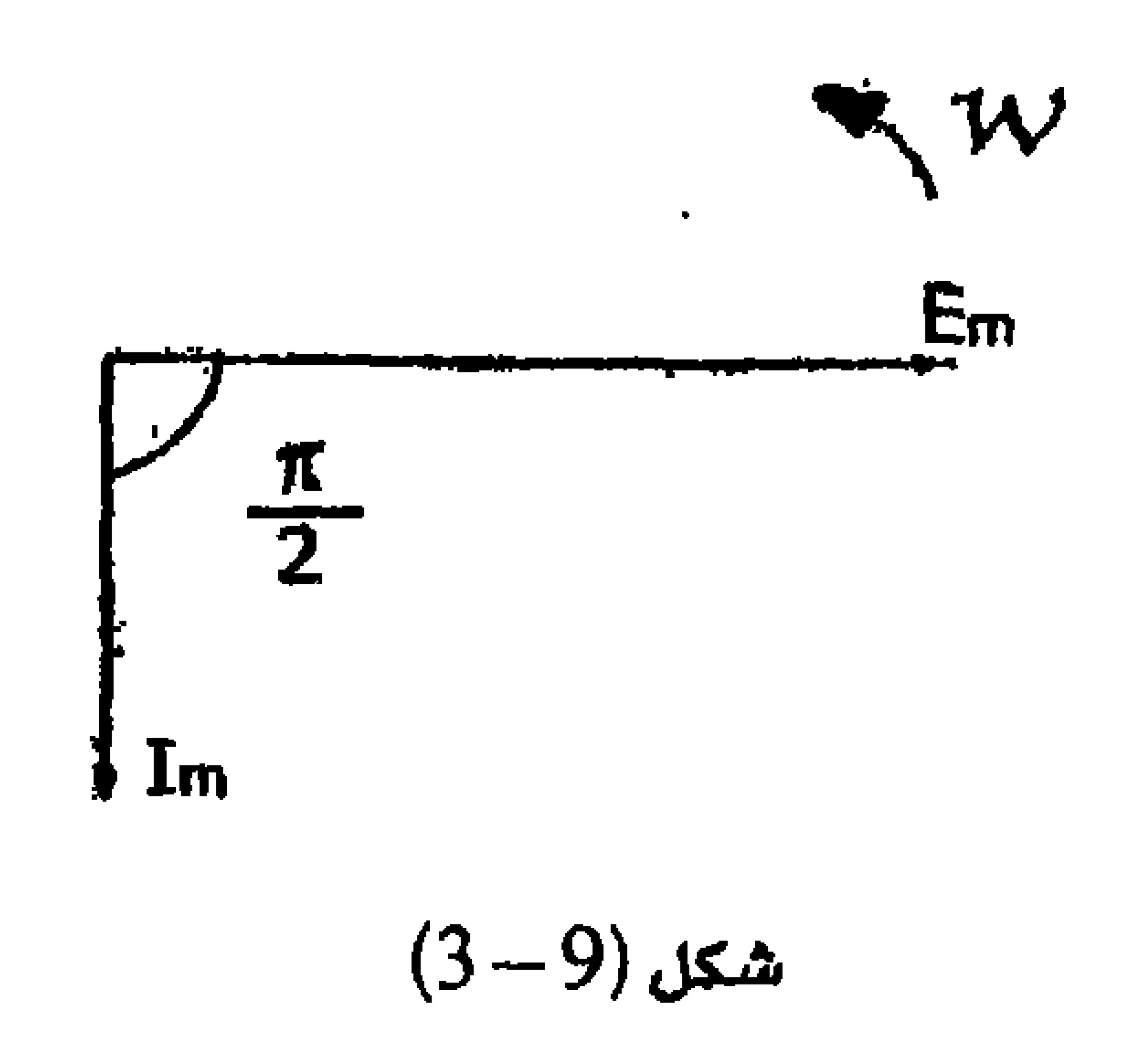
$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = I\omega L \quad \cdots\cdots\cdots \quad (3-18)$$

يبين شكل (8 -3) منحنيات الضغط والتيار والقدرة في الدائرة التي تحتوي على حث ذاتي فقط ، وفيها يظهر أن منحنى التيار لا يقع في توافق مرحلي مع منحنى الضغط كما كان



شكل (8 -3)

الحال في الدائرة ذات المقاومة، وإنما يتأخر عنه بزاوية مقدارها 90°، وهذه نتيجة حتمية لمعادلتي الضغط والتيار، إذ أن كل نقطة wt على منحنى الضغط تناظر $\frac{\pi}{2} - \omega t$ على منحنى التيار. ويقال أن التيار متأخر على الضغط في هذه الحالة بزاوية مقدارها 90°. وعند رسم مخطط المتجهات نجد أن هناك زاوية مقدارها 90° بين متجهي الضغط والتيار، حيث يكون الضغط متقدم على التيار بهذه الزاوية، شكل (9– 3).



شكل (9 – 3)

إذا أردنا الحصول على القدرة اللحظية p، أي القدرة عند أي لحظة t فإن:

$$p = ei = E_m \sin \omega t \, I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$= \frac{E_m I_m}{2} \left[\cos \frac{\pi}{2} - \cos(2\omega t - \frac{\pi}{2}) \right]$$

$$= -\frac{E_m I_m}{2} \sin 2\omega t = -\frac{E^2_m}{2\omega L} \sin 2\omega t$$

$$= - EI \sin 2\omega t \qquad .... (3 - 19)$$

يتضح من المعادلة (19– 3) أن منحنى القدرة هو أيضاً منحنى جيبي تردده ضعف تردد الضغط والتيار، واتساعه عبارة عن $\frac{E_m I_m}{2} = EI$

يبين شكل (8– 3) منحنى القدرة مع الزمن بالنسبة لمنحنى الضغط والتيار، ويلاحظ أن الدورة الواحدة للضغط والتيار يقابلها دورتين من محنى

القدرة، كما أن منحنى القدرة يبدأ بقيم سالبة للقدرة، وهذا يفسر وجود الإشارة السالبة في المعادلة (19 – 3) التي تربط بين القدرة والزمن.

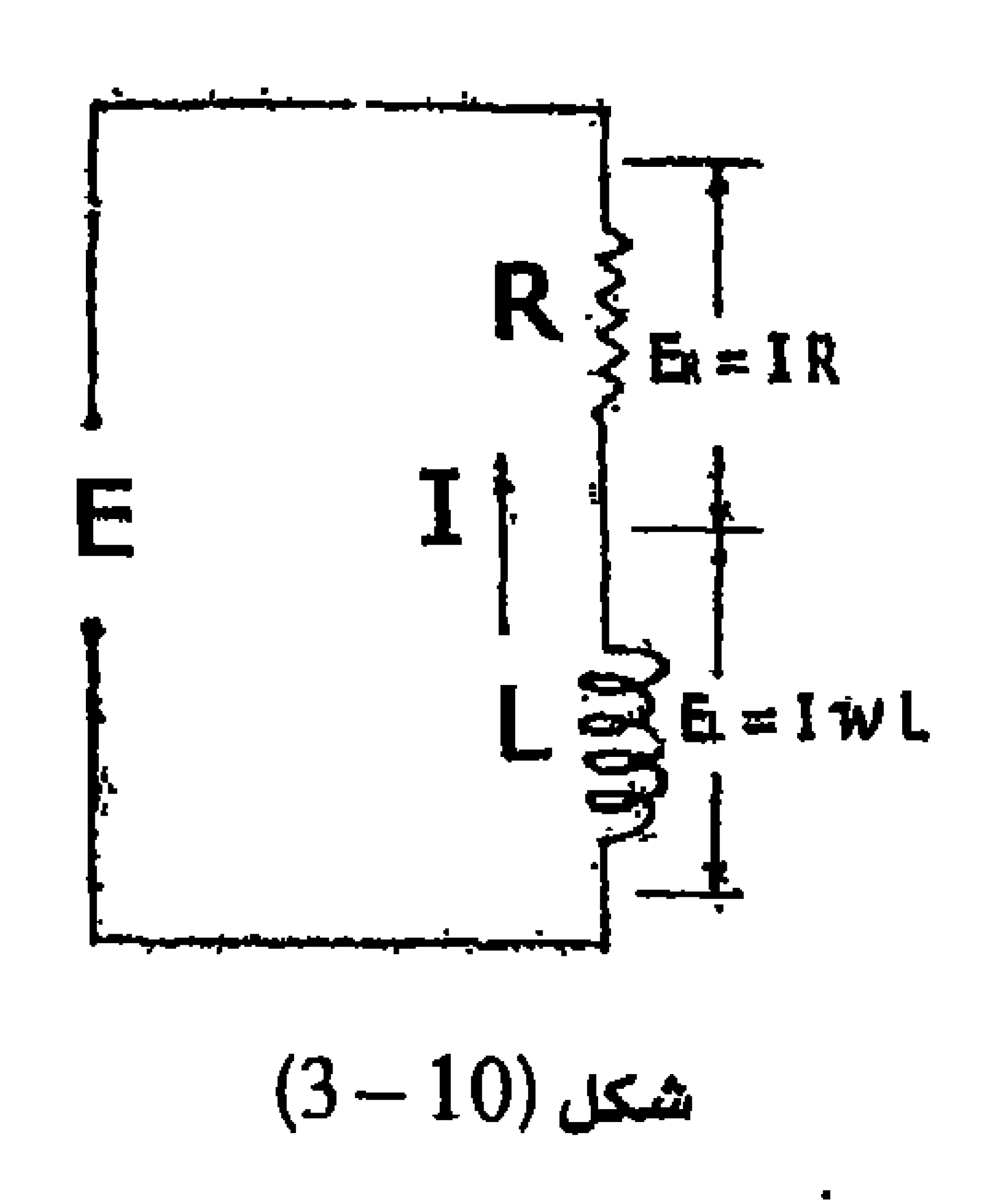
إن القيمة المتوسطة التي يعطيها منحنى القدرة في شكل (8– 3) هي الصفر، ومعنى هذا أن الدائرة لا تمتص أو تبدد أية جزء من الطاقة التي تأخذها من الينبوع، وأن ما يجري فعلاً هو أن الدائرة تأخذ كمية معينة من الطاقة من الينبوع في خلال نصف الدورة الموجب على منحنى القدرة، وتختزنها في المجال المغناطيسي الذي يتكون حول الملف، ثم ترد هذه الكمية بزيها إلى اليبوع، في خال نصف الدورة السالب على منحنى القدرة، وذلك في أثناء اضمحلال المجال المغناطيسي حول الملف. ونظراً لعدم وجود أية مقاومة في الدائرة لا يتبدد أي جزء من الطاقة في خلال عمليات تبادل الطاقة بين الينبوع والمجال الغناطيسي.

القوة الدافعة الكهربية في دائرة تحتوي على مقاومة R وملف ذي حث ذاتي L:

توجد حقيقتان هامتان تسهلان عملية تحليل الدوائر الكهربية التي تحتوي على قوة دافعة كهربية مترددة، وبالتالي تيار وقدرة مترددين. وقد برزت هاتان الحقيقتان في التحليلين السابقين وهما:

1. إذا كان منحنى الضغط جيبي ذا تردد معين، فإن منحنى التيار يكون جيبياً أيضاً بنفس التردد، كما أن منحنى القدرة يكون هو الآخر جيبياً ولكن بضعف التردد.
2. نظراً لأن القيمة الفعالة للضغط E والقيمة الفعالة للتيار I هي التي تحدد القيمة الفعالة للقدرة في الدائرة، فمن الأوفق أن تكون الحسابات جميعاً بدلالة القيم الفعالة، كما أن مخطط المتجهات يجب أن يرسم بدلالة القيم الفعالة، وهذا لن يغير شيئاً من جوهر الموضوع، وذلك لأن القيم الفعالة لكل من الضغط والتيار تتناسب مع قيمة النهاية العظمى بمعامل عددي هو $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ويجب أن نتذكر دائماً، عند إجراء الحسابات بدلالة القيم الفعالة فقط، أن الكميات التي يتناولها البحث هي كميات مترددة، ويمكن عند أية

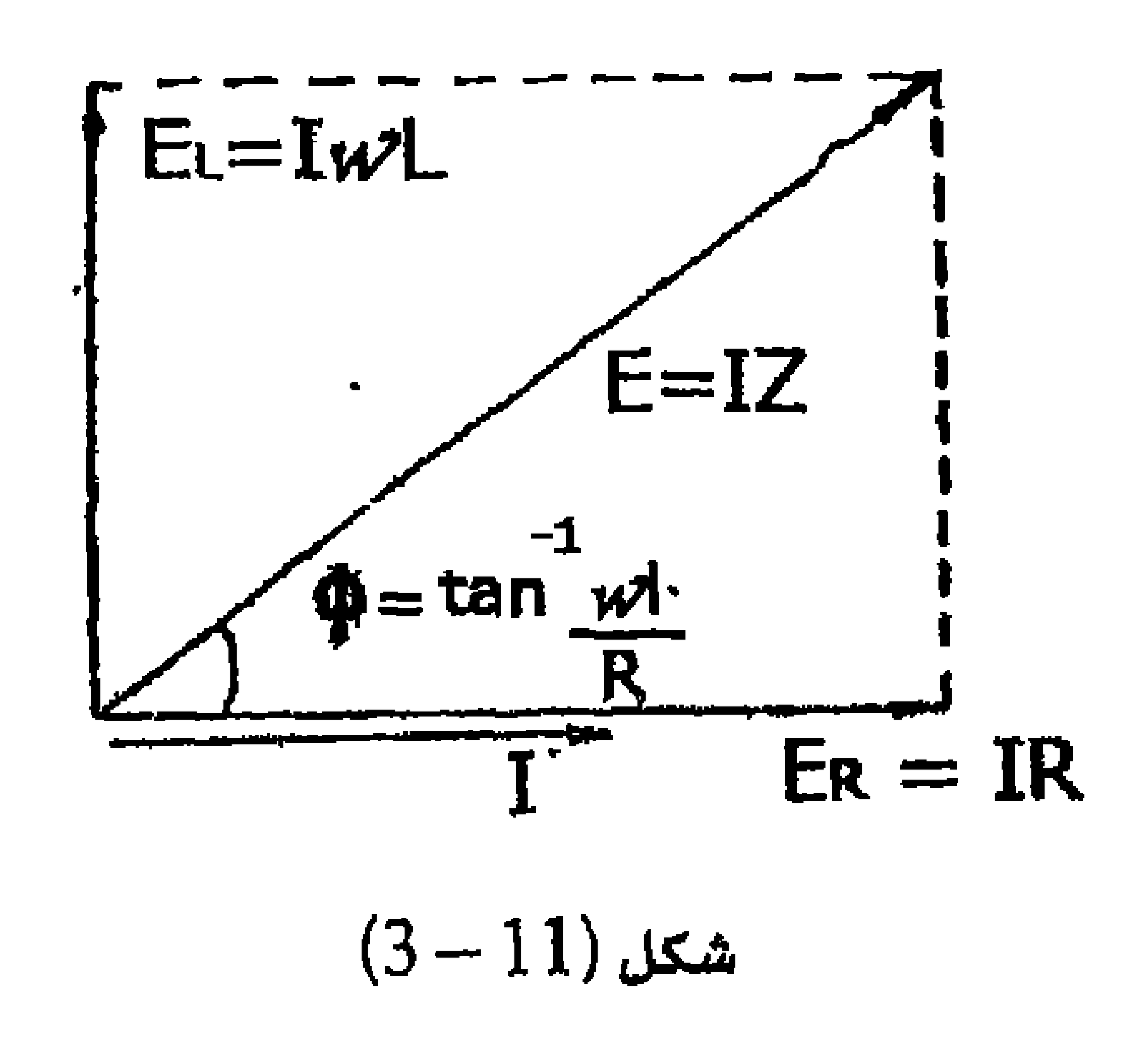
مرحلة من مراحل الحساب وضع هذه الكمية بدلالة قيمها اللحظية. إذا طبقنا هذه الطريقة على الدائرة المبينة في الشكل (10 – 3) يمكن أن نقول أنه لكي يمر التيار ذو القيمة الفعالة I في هذه الدائرة يجب أن يكون للقوة الدافعة الكهربية ذات القيمة الفعالة E مركبتان:



شكل (10 – 3)

أ. قوة دافعة كهربية ER ذات قيمة فعالة على حسب المعادلة (15 – 3) مقدارها IR، وهي في اتفاق مرحلي مع التيار، وتلزم لتمرير التيار I في المقاومة R أوم. شكل (11 – 3).

ب. قوة دافعة كهربية EL ذات قيمة فعالة، على حسب المعادلة (18 – 3) مقدارها IwL، وهي متقدمة على التيار (التيار متأخر بالنسبة لها بزاوية $\frac{\pi}{2}$)، وتلزم لتمرير نفس التيار I في الملف ذي الحث الذاتي L هنري. شكل (11 – 3).



شكل (11 – 3)

بذلك تكون القوة الدافعة الكهربية اللازمة لتمرير التيار I في الدائرة المذكورة ذات قيمة فعالة E بحيث تكون E هي مجموع القوتين الدافعتين ER، EL نظراً لأن الكميات الداخلة في الحساب كلها كميات موجهة تختلف عن بعضها البعض مرحلياً، كما يتضح من شكل (11 – 3) يجب جمعها على مخطط المتجهات. يتضح بمراجعة شكل (11– 3) أن القيمة الفعالة للقوة الدافعة الكهربية E، بعد جمع المتجهات هي:

$$E = \sqrt{\overline{IR}^2 + \overline{I\omega L}^2}$$

$$= I\sqrt{R^2 + \overline{\omega L}^2} = I z \quad \text{.................} \quad (3 - 20)$$

حيث $z = \sqrt{R^2 + \overline{\omega L}^2}$ يطلق عليها اسم المعاوقة الحثية وهي تقاس بالأوم أيضاً، وتمثل نوعاً من أنواع المقاومة في الدائرة، ويعبر عنه بالمعاوقة.

وبالنسبة للعلاقة المرحلية بين الضغط والتيار نجد أن التيار متأخر على القوة الدافعة الكهربية أو الضغط بزاوية الاختلاف المرحلي ϕ.

حيث $$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad \text{.................} \quad (3 - 21)$$

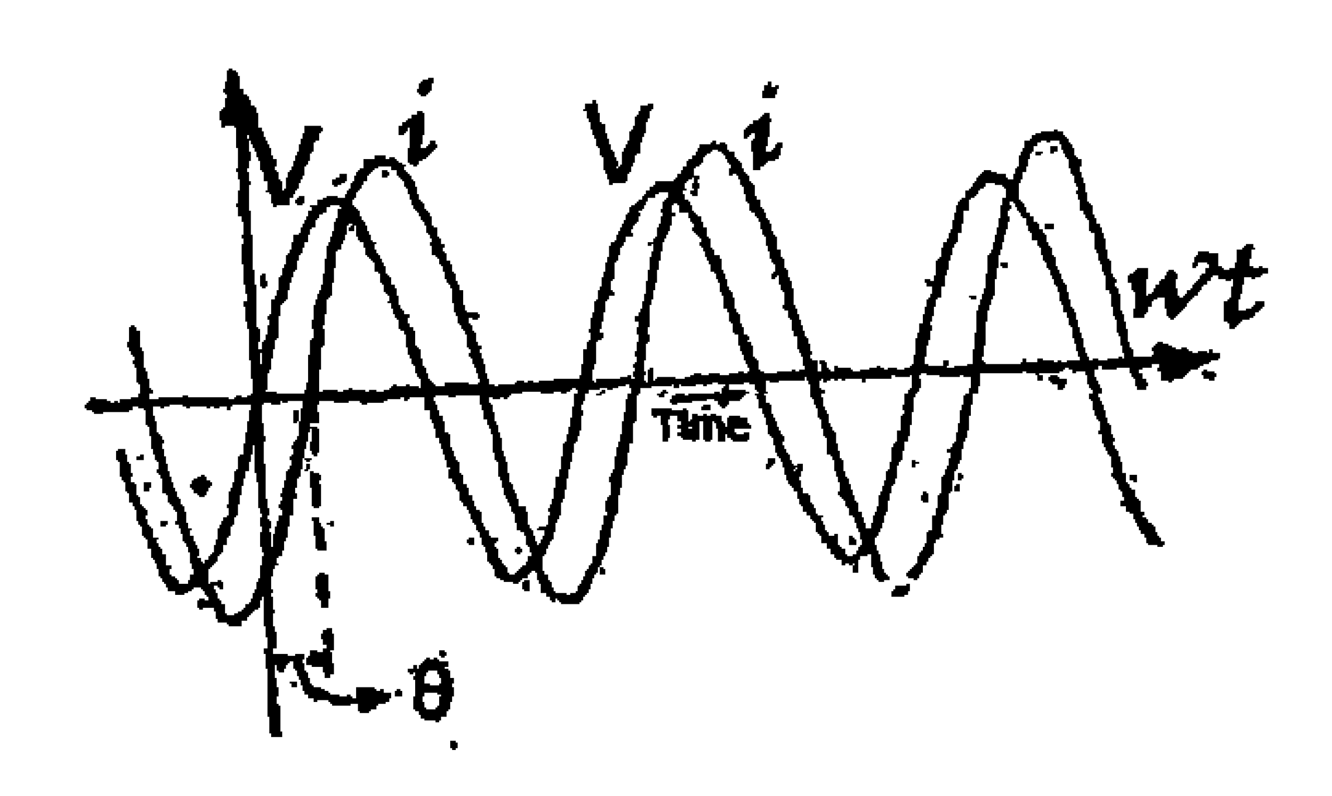
وإذا أردنا الحصول على القيم اللحظية لكل من الضغط والتيار بدلالة القيم الفعالة، وزاوية الاختلاف المرحلي ϕ نجد أن:

$$e = \sqrt{2}\, E \sin \omega t = E_m \sin \omega t$$

$$i = \sqrt{2}\, I \sin(\omega t - \phi) = I_m \sin(\omega t - \phi) \quad \text{........} \quad (3 - 22)$$

يبين شكل (12– 3) منحنى i,e كما تمثلها المعادلة (22 – 3).

القيمة اللحظية للقدرة في الدائرة هي:



شكل (3 – 12)

$$p = ei = 2\,EI \sin \omega t \sin(\omega t - \phi)$$

$$= EI\{\cos\phi - \cos(2\omega t - \phi)\}$$

$$= EI\cos\phi - EI\cos(2\omega t - \phi) \quad \text{.................} \quad (3-23)$$

أي أن قيمة القدرة اللحظية تتكون من حدين، الحد الأول $EI \cos\Phi$، وهو ثابت المقدار، ويمثل القدرة الفعالة في الدائرة. والحد الثاني ($EI \cos(2wt\ \Phi$) وهو كمية مترددة قيمتها المتوسطة صفر، وترددها ضعف التردد الأصلي للضغط والتيار. وبذلك يكون متوسط قيمة القدرة التي تمتص في الدائرة، وهي عبارة عن القدرة الفعالة في الدائرة هي:

$$P = EI\cos\phi \quad \text{وات} \quad \text{.......................} \quad (3-24)$$

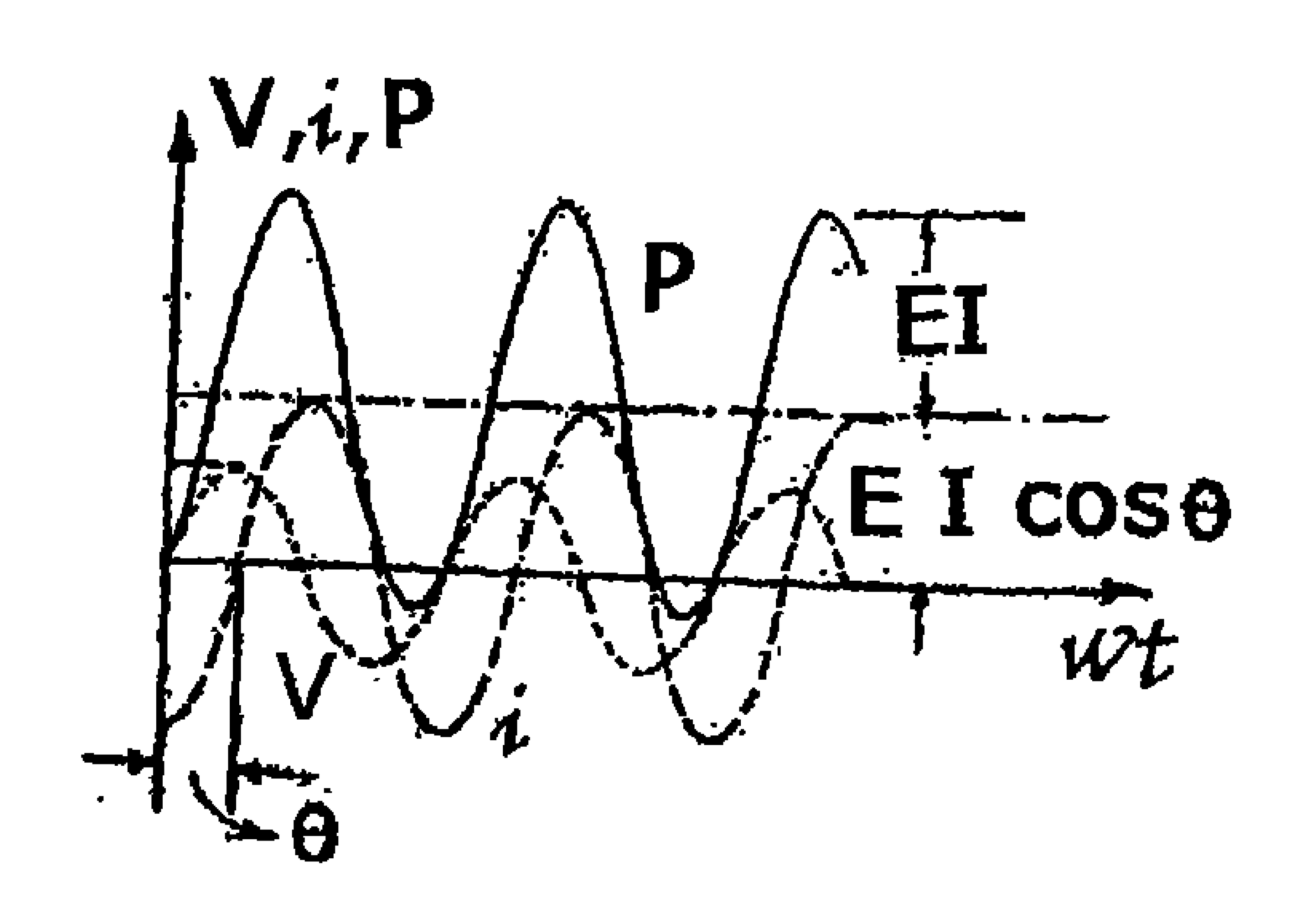
بالتعويض عن $IR = E\cos\Phi$ في المعادلة (24– 3) ينتج أن:

$$P = E\cos\phi\, I = I^2R$$

أي أن القدرة الفعالة في الدائرة عبارة عن القدرة التي تتبدد في الدائرة على شكل مفقودات حرارية في المقاومة.

يبين شكل(13 – 3) القدرة في الدائرة الحثية، كما تمثلها المعادلة (23 – 3) حيث يمثل المنحنى V الدالة $EI\sin 2\omega t \sin\phi$ والمنحنى i الدالة $EI\cos 2\omega t \cos\phi$،

يلاحظ عند مقارنة الشكلين (8– 3) و (13– 3) ان الفرق الأساسي بينهما ناشئ عن أن الخط:



شكل (13– 3)

الأفقي الذي ترسم حوله القدرة المترددة $EI\ \sin\ 2\ wt$، هو نفسه المحور الأفقي في الشكل (8– 3)، وفي الشكل (13– 3) يرتفع عن المحور الأفقي بالقيمة $EI\ \cos^{\Phi}$. كما يلاحظ تغير الحد EI في المعادلة (14– 3) إلى $EI\ \cos^{\Phi}$ في المعادلة (23– 3)، والحد $EI\ \sin\ 2\ wt$ في المعادلة (14– 3) إلى $EI\ \cos\ (2\ wt - ^{\Phi})$ في المعادلة (23– 3).

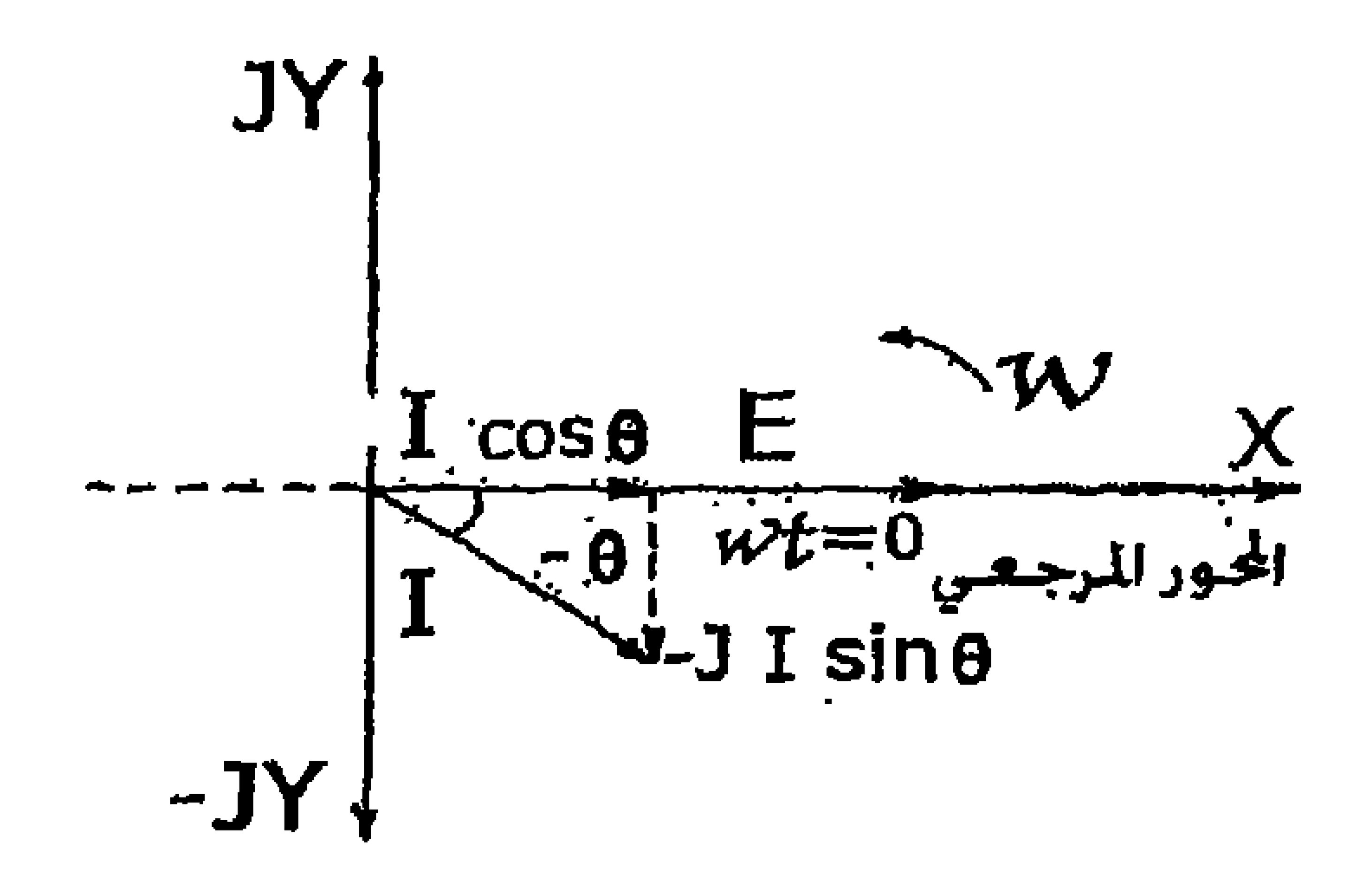
يطلق على $\cos^{\Phi}$ لذلك، اسم معامل القدرة إذ إنه يمثل العامل الذي تتوقف عليه قيمة القدرة التي تمتص في الدائرة. فإذا كانت الدائرة تحتوي على مقاومة فقط فإن $^{\Phi} = 0$، وتكون قيمة معامل القدرة $\cos^{\Phi}$ أكبر ما يمكن وهي الواحد صحيح. وإذا اشتملت الدائرة على مقاومة وحث ذاتي، فإن قيمة $^{\Phi}$ تقع بين الصفر، $\frac{\pi}{2}$، كما أن معامل القدرة يتراوح بين الوحدة والصفر. وكلما ازدادت قيمة الحث الذاتي بالنسبة للمقاومة قلت قيمة معامل القدرة حتى يصبح صفراً، وعندما تكون $^{\Phi} = \frac{\pi}{2}$ وذلك عندما تحتوي الدائرة على حث ذاتي فقط.

طريقة الحساب بالكميات التخيلية:

نستخدم المعادلة (20 – 3) للحصول على قيمة التيار في دائرة تحتوي على مقاومة R أوم وممانعة حثية $XL = wL$ أوم، وذلك عند تغذية هذه الدائرة من ينبوع ذي ضغط متردد قيمته الفعالة E فولت، وتكون قيمة التيار هي:

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \overline{\omega L}^2}}$$ أمبير

وتكون Z هي قيمة المقاومة في الدائرة بالأوم. ونلاحظ أننا قد طبقنا قانون أوم بقسمة الضغط على المعاوقة للحصول على التيار، وذلك باعتبار أن المعاوقة في دائرة التيار المتردد تقوم مقام المقاومة في دائرة التيار المستمر. ولما كان التيار في دائرة التيار المتردد كمية موجبة تتحد بقيمتها ووضعها المرحلي بالنسبة للزمن فإن المعلومات التي نحصل عليها بهذه الطريقة تصبح ناقصة، ويجب تكملتها بحساب زاوية الاختلاف المرحلي بين التيار وبين كمية موجبة أخرى ذات وضع محدد بالنسبة للمحور الذي يبدأ عنده حساب الزمن، أي المحور الذي يحدد اللحظة صفر = 4. ولما كان تحديد الأوضاع المرحلية للكميات المختلفة والاختلاف المرحلي بينهما يمكن أن يتم عند أية لحظة، تختار في العادة لحظة الصفر لهذا الغرض، ويعتبر الضغط في هذه الحالة هو محور الأصل الذي تنسب إليه جميع الكميات، شكل (14 – 3). إذا كان التيار متأخراً عن الضغط بزاوية مقدارها $\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$ ، تكون الزاوية التي يصنعها موجه التيار مع الضغط عند اللحظة $t = 0$ هي $-\phi$ ، كما هو مبين في الشكل (14– 3) على المستوى التخيلي بحيث ينطبق الضغط E على المحور الأفقي، ويصنع التيار I الزاوية ϕ معه، يمكن كتابة الضغط والتيار على النحو الآتي:



شكل (3 – 14)

$$\dot{E} = E$$

$$\dot{I} = I\cos\phi - jI\sin\phi \quad \text{.................} \quad (3-25)$$

حيث يعني وضع نقطة فوق كل من E، I إعطاء الكمية الموجهة ممثلة على المستوى التخيلي، وتستخدم j بدلاً من $i = \sqrt{-1}$ لكي لا يحدث لبس بين I التي تساوي $\sqrt{-1}$ و I التي تستخدم كرمز للتيار.

يلاحظ أن المعادلة (25– 3) تعطي كل المعلومات المطلوبة عن التيار، فنجد أن قيمة التيار $I = \sqrt{(I\cos\phi)^2 + (I\sin\phi)^2}$ كما أن الزاوية التي يصنعها مع محور الأصل أو المرجع (وهو ينطبق على الضغط كمرجع) هي: $-\phi = \tan^{-1}\frac{-\sin\phi}{\cos\phi}$.

إذا كانت $\dot{z}$ هي المعاوقة ممثلة تمثيلاً مناسباً، بحيث يمكن تطبيق قانون أوم مباشرة للحصول على جميع المعلومات اللازمة عن التيار نجد أن:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}} = \frac{E}{\dot{Z}} \quad \text{.................} \quad (3-26)$$

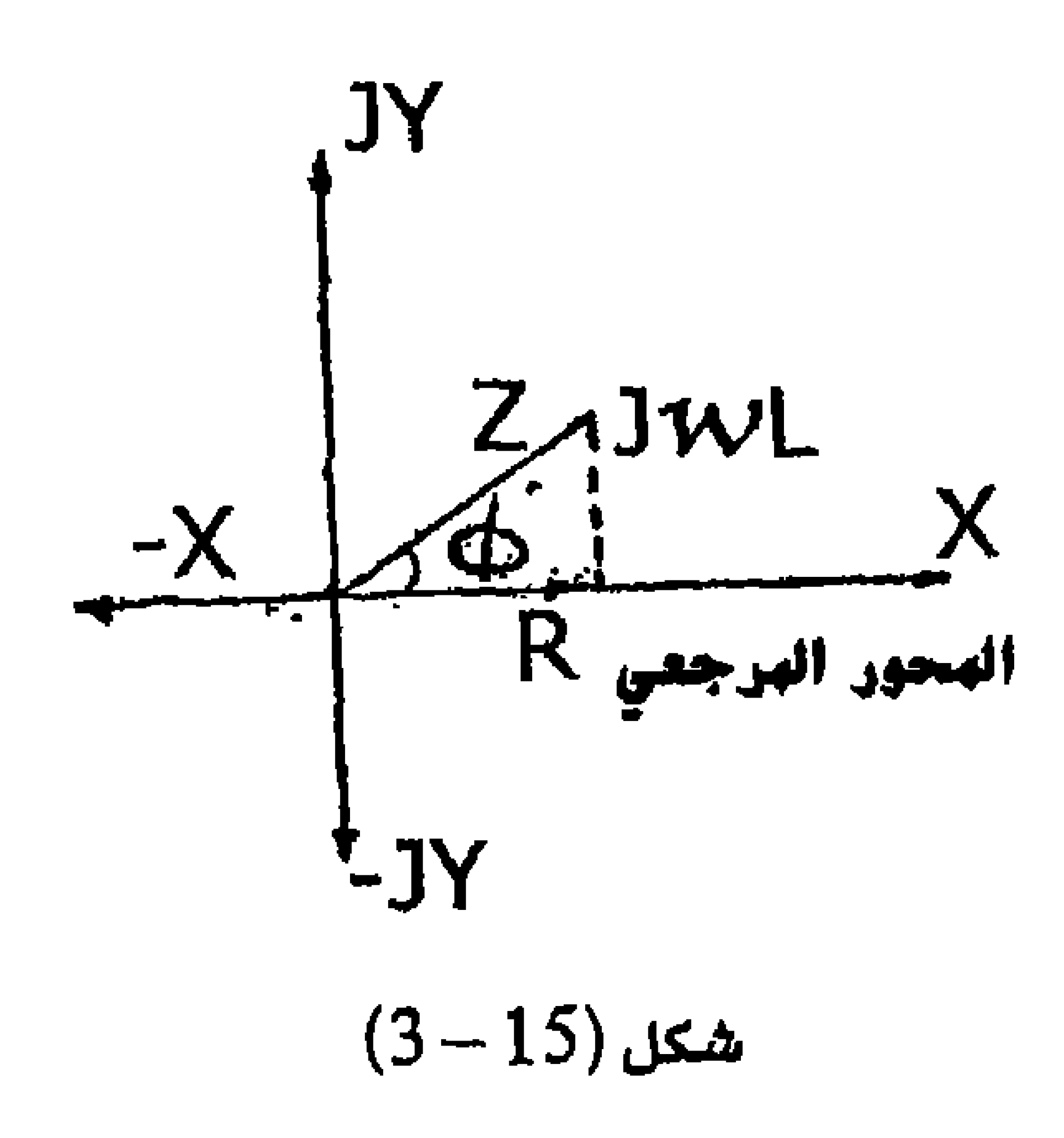
$$\therefore \quad I\cos\phi - jI\sin\phi = \frac{E}{\dot{Z}}$$

$$\therefore \quad \dot{Z} = \frac{E(I\cos\phi + jI\sin\phi)}{(I\cos\phi - jI\sin\phi)(I\cos\phi + jI\sin\phi)}$$

$$= \frac{E}{I}\cos\phi + j\frac{E}{I}\sin\phi$$

$$\therefore \quad \dot{z} = z\cos\phi + jz\sin\phi = R + j\omega L \qquad (3-27)$$

وبذلك تصبح $\dot{z}$ كميو موجهة ممثلة على المستوى التخيلي بحيث يكون R هو الجزء الحقيقي فيها، wL هو الجزء التخيلي، شكل (15 –3).



شكل (15 – 3)

إن استخدام $\dot{z}$ من المعادلة (27 – 3) في المعادلة (26 – 3) تعطينا جميع المعلومات عن التيار، أو تعطينا التيار ككمية موجهة.

$$I = \frac{\dot{E}}{\dot{z}} = \frac{E}{R + j\omega L} = \frac{E(R - j\omega L)}{(R + j\omega L)(R - j\omega L)}$$

$$= \frac{E}{R^2 + \omega L^2} R - j\frac{E}{R^2 + \omega L^2}\omega L$$

$$= I\cos\phi - jI\sin\phi$$

$$|\dot{I}| = \sqrt{(I\cos\phi)^2 + (I\sin\phi)^2} = I$$

$$\phi = \tan^{-1}\frac{-\sin\phi}{\cos\phi}$$

وتكون ϕ زاوية سالبة أي أن التيار متأخر عن الضغط بهذه الزاوية. يعني الرمز $|\dot{I}|$ القيمة العددية للكمية الموجهة $\dot{I}$

القوة الدافعة الكهربية المترددة في دائرة تحتوي على مكثف:

يتكون المكثف من لوحين معدنيين بينهما مادة عازلة، وعند توصيل ضغط كهربي قيمته e فولت بين لوحي المكثف فإنه يشحن بشحنة كهربية مقدارها q كولوم. وتتوقف قيمة هذه الشحنة على سعة المكثف C التي تقاس بالفاراد، كما أنها تتناسب أيضاً مع قيمة الضغط الكهربي بين اللوحين، بحيث تكون العلاقة بين هذه الكميات الثلاث هي:

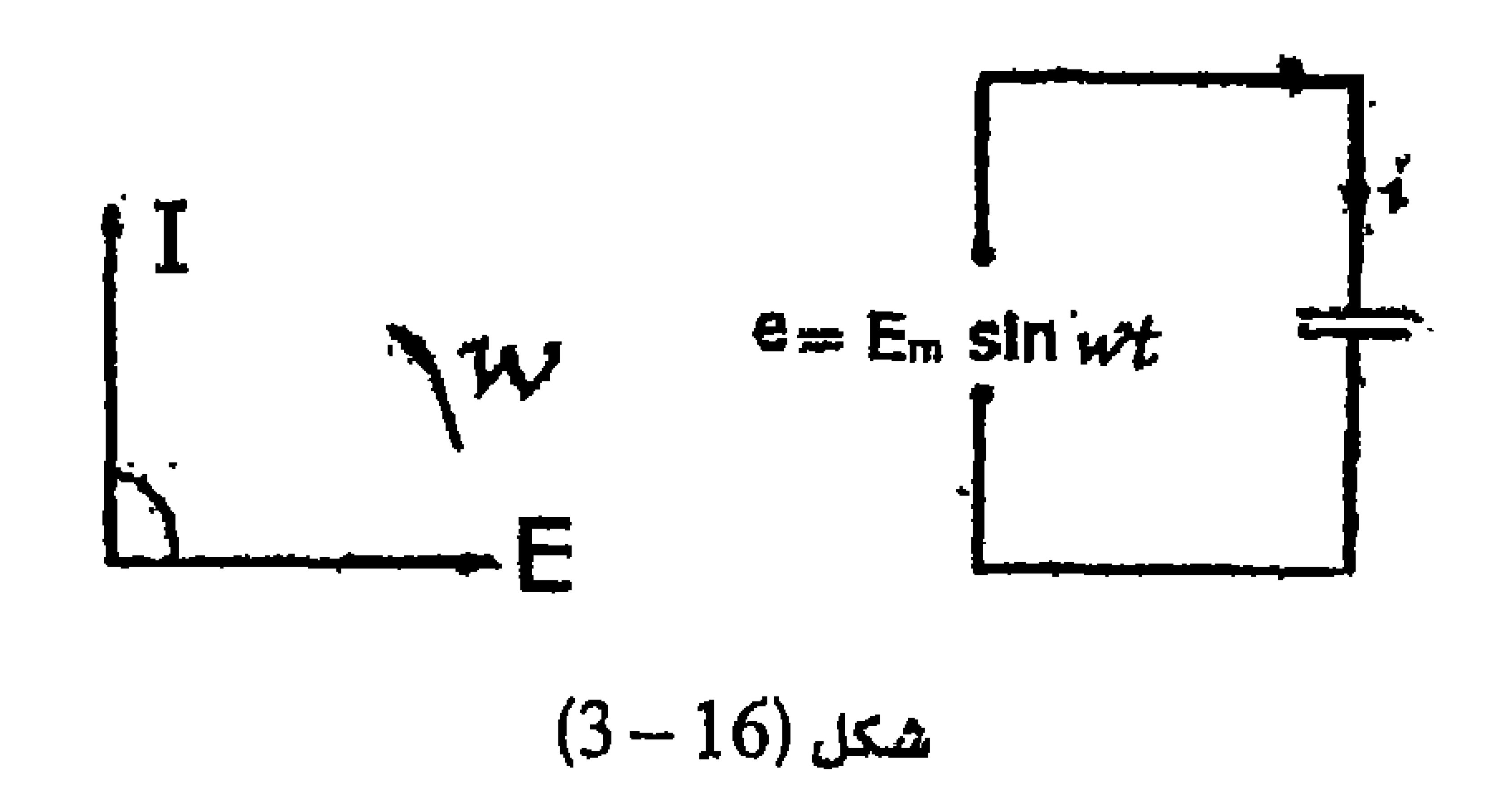
$$(3-28)\ ....Q = Ce$$

وإذا كانت الشحنة الموجودة على المكثف عند أية لحظة t هي q كولوم، فإن قيمة التيار الذي يمر في دائرة المكثف عند هذه اللحظة بالأمبير i هو عبارة عن معدل تغير قيمة الشحنة بالنسبة للزمن أي أن:

$$(3-29)\ ....\ i = \frac{dq}{dt}$$

افرض أن القوة الدافعة الكهربية المترددة $e = E_m \sin wt$ قد وصلت إلى دائرة تحتوي على مكثف سعته C فاراد، شكل (16 – 3)، وأن التيار المار في الدائرة عند أية لحظة هو i أمبير، نظراً لوجود المكثف بمفرده في الدائرة فإن الضغط على طرفي المكثف عند أية لحظة يساوي ضغط الينبوع عند هذه اللحظة، فإذا كانت

الشحنة على المكثف عند اللحظة t هي q كولوم، بتطبيق المعادلتين (28– 3)، (29 – 3) ينتج أن:



شكل (16 – 3)

$$q = Ce = CE_m \sin \omega t$$

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(CE_m \sin \omega t)$$

$$= C\omega E_m \cos \omega t$$

$$= \frac{E}{\frac{1}{\omega C}} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = \frac{E_m}{X_C} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$(3-30) \;\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad i = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$I_m = \frac{E_m}{X_C} \quad , \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

يطلق على XC اسم الممانعة السعوية وهي تقاس بالأوم، ويكون التيار في هذه الحالة متقدماً على الضغط بزاوية مقدارها $\frac{\pi}{2}$ أي 90° كما في شكل (16 – 3).

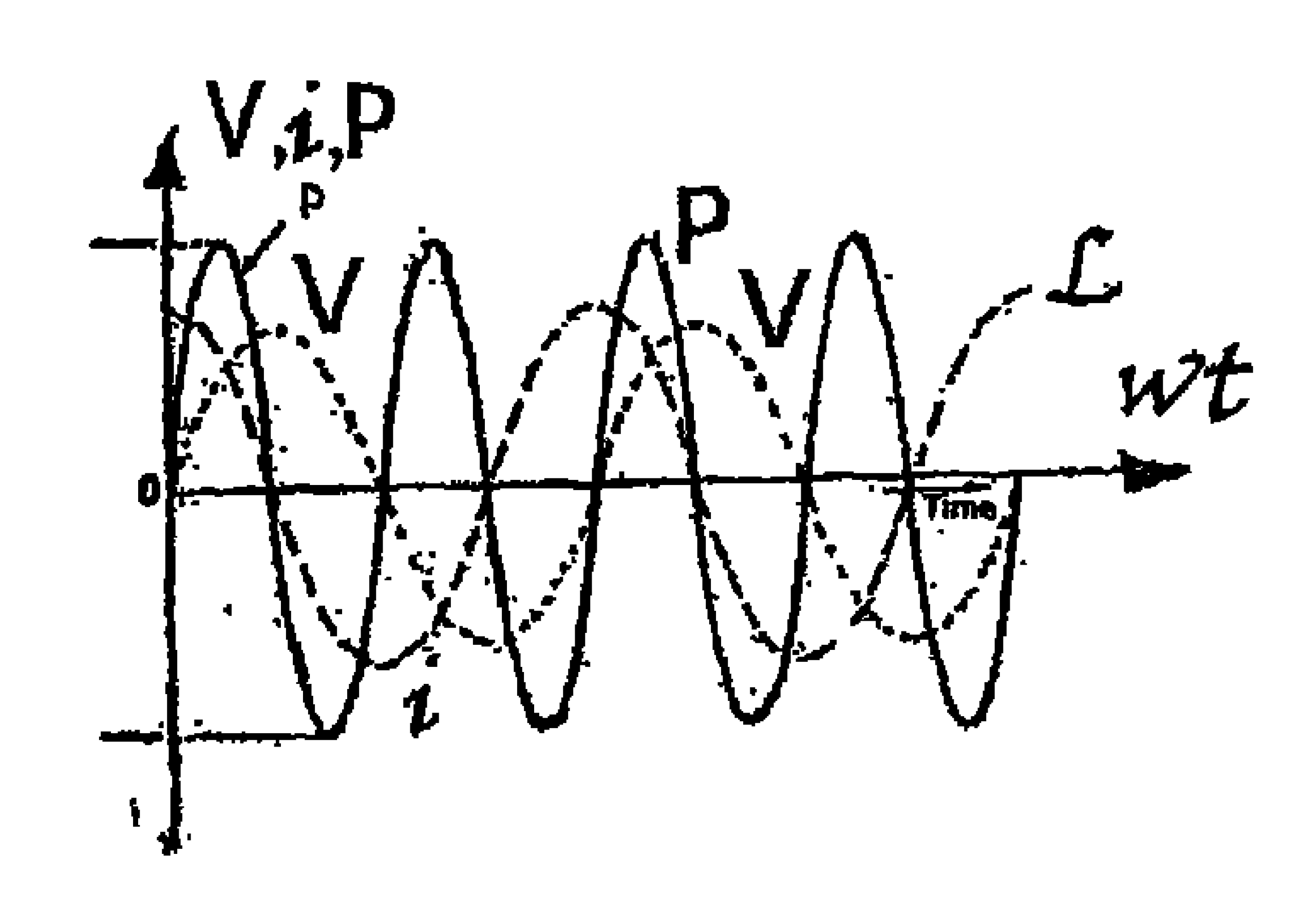
تقاس السعة عادة بالميكروفاراد = $\frac{1}{10^6}$ فاراد، وذلك لأن الفاراد وحدة كبيرة. فإذا كانت C بالميكروفاراد فإن XC تصبح بالأوم.

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi fC}$$

يتضح من المعادلة (31– 3) أن منحنى القدرة مع الزمن هو منحنى جيبي تردده ضعف تردد التيار والضغط. وأن قيمة النهاية العظمى للقدرة، وهي عبارة عن اتساع المنحنى الجيبي أيضاً، هي

$EI = \frac{E_m I_m}{2} = \frac{E^2_m \omega C}{2}$ لتفسير تردد القدرة بين موجبة وسالبة هو أن الينبوع يعطي كمية معينة من الطاقة خلال نصف الدورة الموجبة يشحن بها المكثف، ثم يفرغ المكثف هذه الكمية من الطاقة في الينبوع مرة أخرى في خلال نصف الدورة السالبة. ومعنى هذا أن القدرة التي تمتص في الدائرة تساوي صفراً، وذلك نظراً لعدم وجود أية مقاومة في الدائرة تبدد فيها القدرة أثناء تبادل الطاقة بين المكثف والينبوع.

يبين شكل (17– 3) منحنيات التيار والضغط والقدرة في الدائرة التي تحتوي على مكثف فقط.

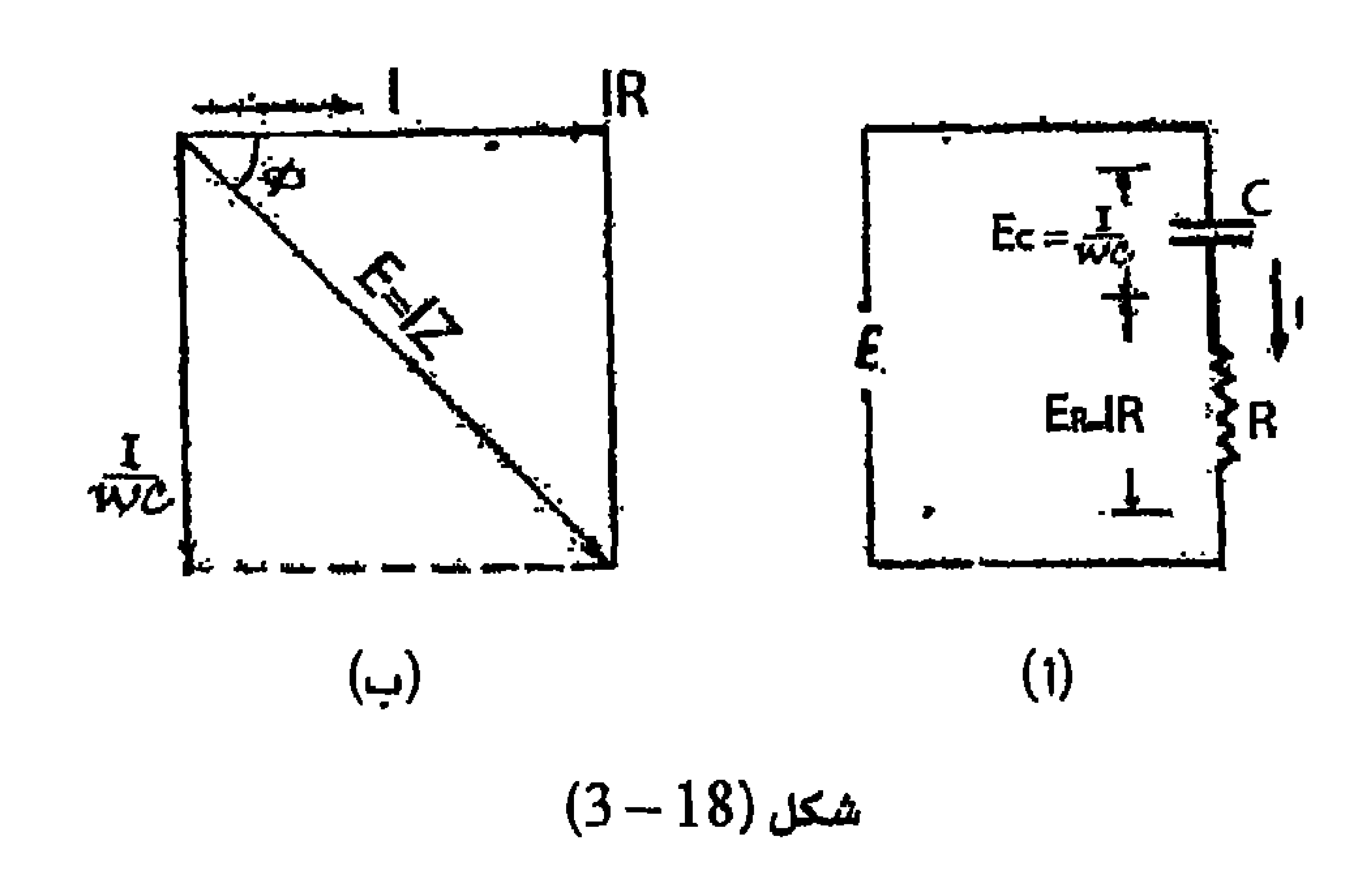


شكل (17 – 3)

وهذه المنحنيات تمثل الضغط المتردد، والتيار والقدرة الناشئين في الدائرة كما تعطينا المعادلتان (30– 3)، (31– 3).

القوة الدافعة الكهربية المترددة في دائرة تحتوي عل مقاومة ومكثف موصلين على التوالي:

يبين شكل (18 – 3) دائرة توالي تحتوي على مكثف ومقاومة موصلة إلى ينبوع ذي ضغط متردد $e = Em \sin wt$. إذا كانت القيمة الفعالة للتيار الذي يمر في الدائرة هي I أمبير، وكانت القيمة الفعالة لضغط الينبوع هو $E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$ فولت، يجب أن يتكون هذا الضغط من مركبتين:



شكل (18 – 3)

أ. المركبة ER وهي التي تعمل على تمرير التيار I في المقاومة R وقيمة هذه المركبة IR، وهي في اتفاق مرحلي مع التيار، شكل (18 – 3ب).

ب. المركبة EC، وهي التي تعمل على تمرير التيار I في المكثف C، وقيمة هذه المركبة $IXC = IwC$، وهي مختلفة مرحلياً عن التيار (التيار متقدم على الضغط) بزاوية مقدارها °90 شكل (18– 3ب).

بجمع هاتين المركبتين ينتج أن القيمة الفعالة للقوة الدافعة الكهربية E هي:

$$E = \sqrt{IR^2 + (\frac{1}{\omega C})^2}$$

$$= I\sqrt{R^2 + (\frac{1}{\omega C})^2} = I\sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$$= IZ$$

$$\therefore \quad I = \frac{E}{Z} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \quad \text{............... (3 – 32)}$$

حيث Z هي المعاوقة السعوية في الدائرة وتقاس مثل المعاوقة الحثية بالأوم، ويكون التيار في هذه الحالة متقدماً على الضغط بزاوية ϕ حيث:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{X_C}{R} = \tan^{-1} \frac{1}{\omega CR}$$

يمكن، بعد معرفة القيم الفعالة للضغط والتيار، وقيمة زاوية الاختلاف المرحلي ϕ أن نعبر عن كل من الضغط والتيار بدلالة القيمة اللحظية عند أية لحظة t، كما فعلنا في الدائرة الحثية، وذلك على النحو التالي:

$$e = E_m \sin \omega t = \sqrt{2}\ E \sin \omega t$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \phi) = \sqrt{2}\ I \sin(\omega t + \phi)$$

القيمة اللحظية للقدرة في الدائرة هي

$$p = ei = E_m \sin \omega t\ I_m \sin(\omega t + \phi)$$

$$= EI\ [\cos\phi - \cos(2\omega t + \phi)]$$

$$p = EI \cos\phi - EI \cos(2\omega t + \phi) \quad \text{............... (3 – 33)}$$

أي أن قيمة القدرة اللحظية تتكون من حدين، الحد الأول $EI \cos\phi$ وهو ثابت المقدار، ويمثل القدرة الفعالة في الدائرة، والحد $EI \cos(2\ wt + \phi)$ وهو

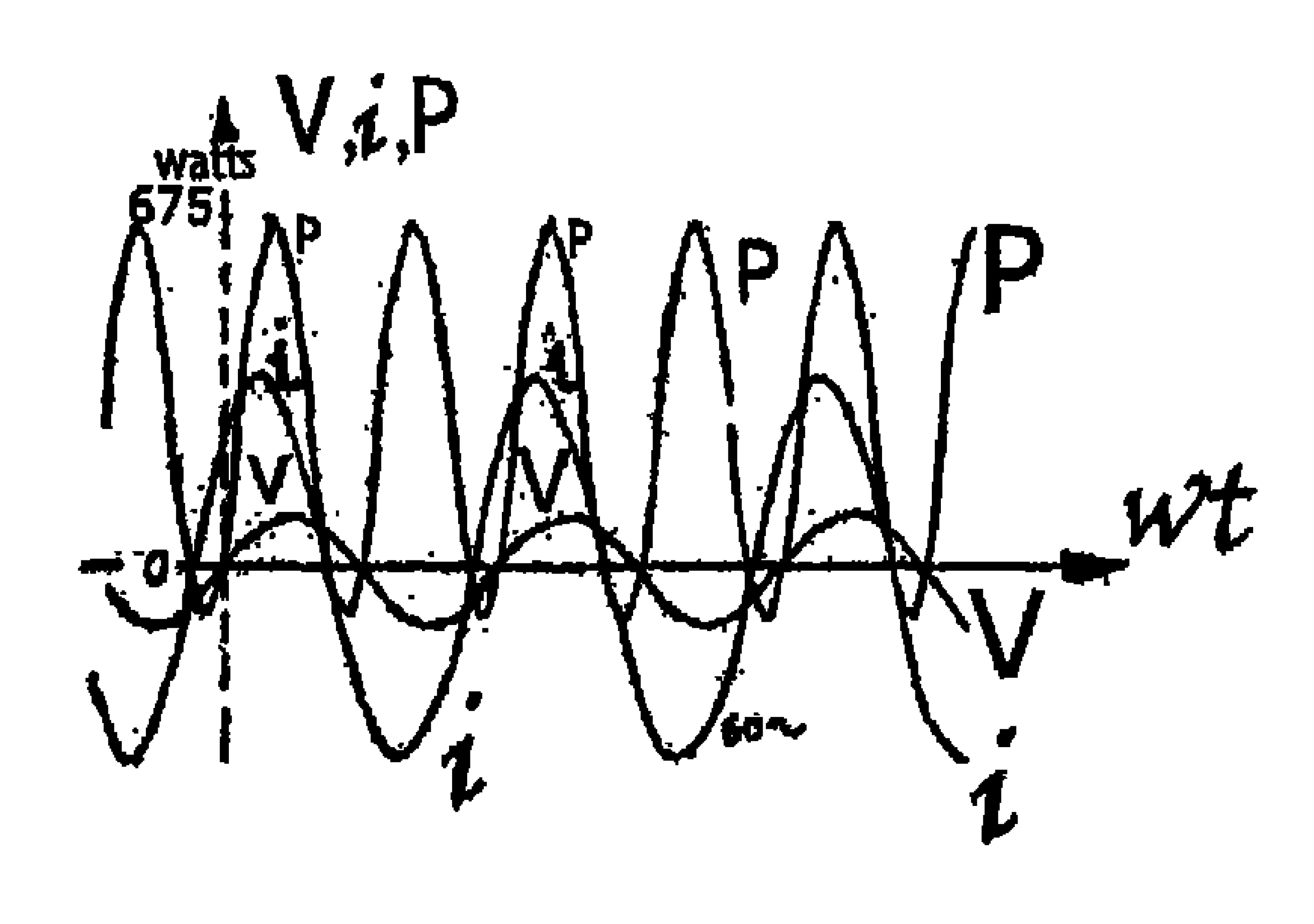
كمية مترددة قيمتها المتوسطة صفر، وترددها ضعف التردد الأصلي للضغط والتيار. بذلك يكون متوسط قيمة القدرة التي تمتص في الدائرة، وهي عبارة عن القدرة الفعالة في الدائرة هي:

$$P = EI\cos\phi \quad \text{وات} \qquad (3-34)$$

بالتعويض عن $IR = E\cos\phi$ في المعادلة (3 – 34) ينتج أن:

$$P = E\cos\phi\, I = I^2 R$$

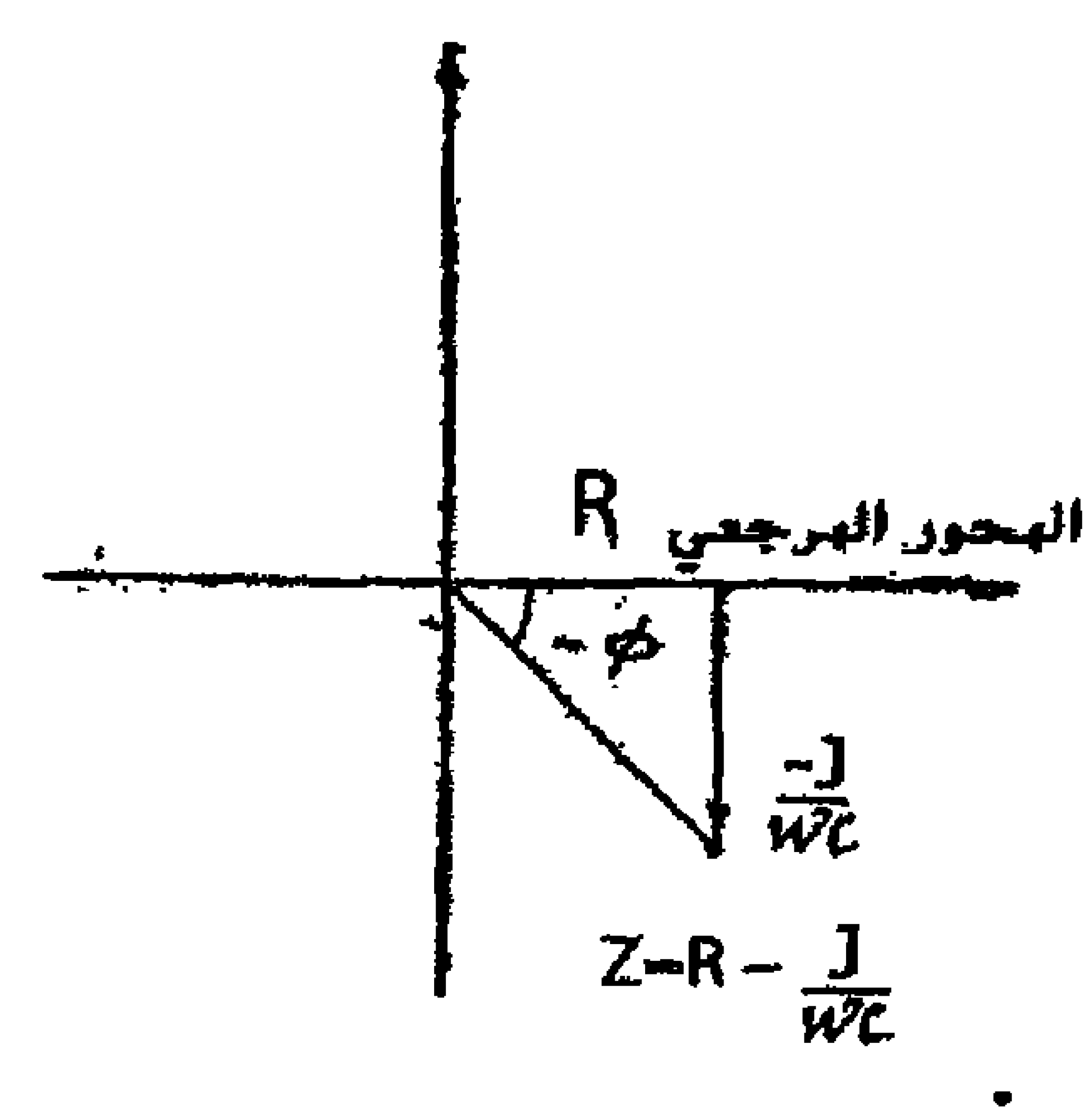
أي أن القدرة الفعالة في الدائرة هي عبارة عن القدرة التي تتبدد في الدائرة على شكل مفقودات حرارية في المقاومة. يبين شكل (19 – 3) التيار والضغط والقدرة في دائرة تحتوي على مقاومة ومكثف، حيث تمثل المعادلة (33 – 3) منحنى القدرة المبين في الشكل.



شكل (19 – 3)

إذا أردنا الحساب بالكميات التخيلية يجب أن نتبع نفس الطريقة التي اتبعناها مع الدائرة التي تحتوي على مقاومة R وممانعة حثية XL، مع مراعاة أن تأثير الممانعة السعوية في الدائرة يعطي تأثيراً مضاداً لتأثير الممانعة الحثية، إذ بينما ينتج تيار متقدم 90° في حالة الممانعة السعوية، يكون متأخراً بزاوية 90° في حالة الممانعة الحثية. ولذلك إذا كانت الممانعة الحثية تمثل بالكمية

التخيلية jXL يجب تمثيل الممانعة السعوية بالقيمة التخيلية jXC– وتكون قيمة $\dot{z}$ في الدائرة التي تحتوي على مقاومة وممانعة سعوية، شكل (20 – 3) هي:



شكل (20 – 3)

$$\dot{z} = R - jX_C \qquad (3-35)$$

$$= \left|\dot{z}\right| \underline{\left|-\phi\right.}$$

$$\left|\dot{z}\right| = \sqrt{R^2 + X_C^2} \;,\; \phi = \tan^{-1}\frac{X_C}{R} = \tan^{-1}\frac{1}{\omega CR}$$

وبذلك يمكن الحصول على التيار بشكل كمية موجهة على أساس أن القوة الدافعة الكهربية، أو الضغط ينطبق على محور الأصل أو المرجع، وهو المحور الأفقي، ويمثل بكمية حقيقية:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{\dot{z}} = \frac{E}{R - jX_C} = \frac{E(R + jX_c)}{(R - jX_C)(R + jX_C)}$$

م ١١

$$\dot{I} = \frac{E}{\sqrt{R^2+X^2_C}} \cdot \frac{R}{\sqrt{R^2+X^2_C}} + j\,\frac{E}{\sqrt{R^2+X^2_C}} \cdot \frac{X_C}{\sqrt{R^2+X^2_C}}$$

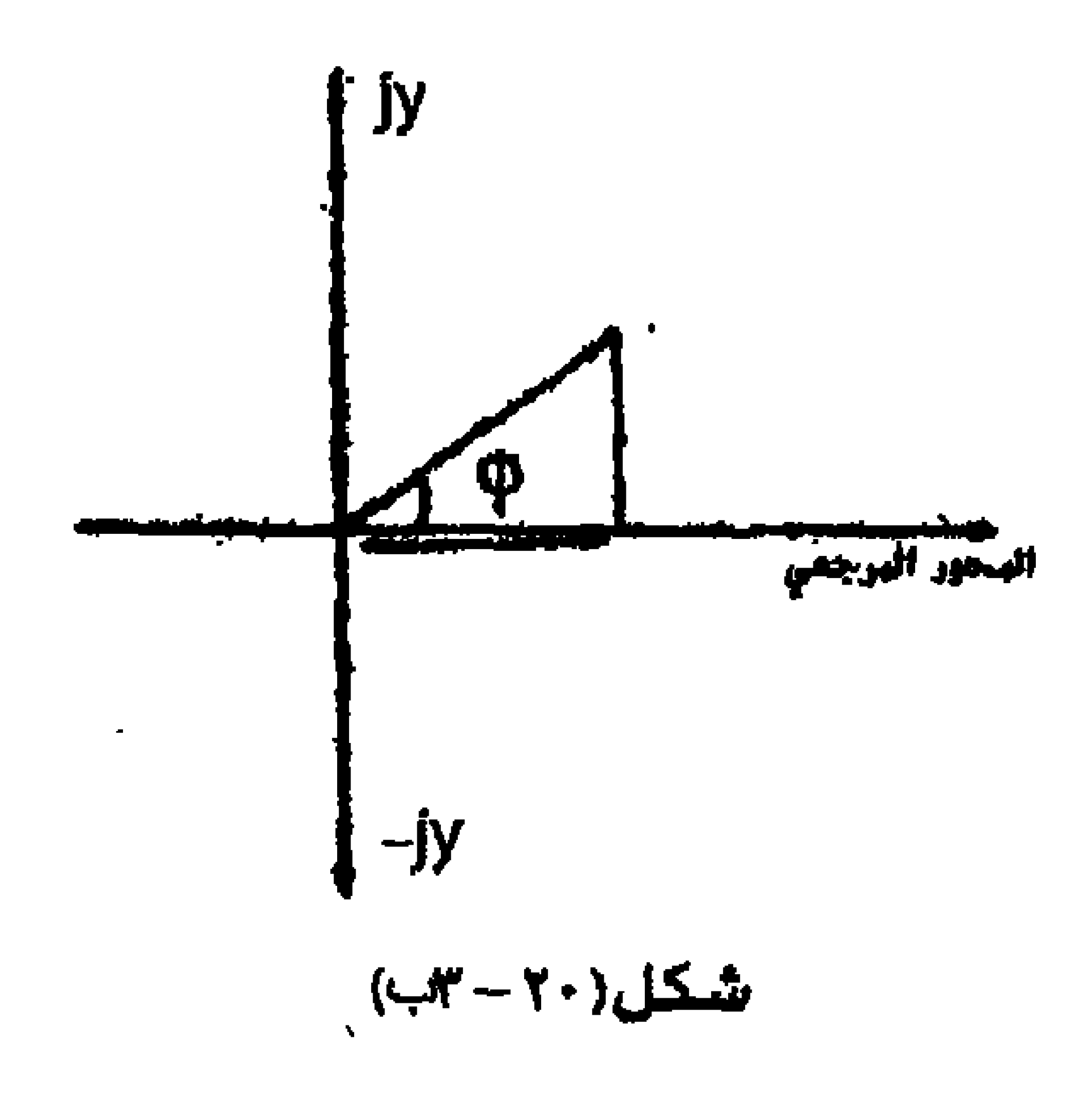
$$= I\cos\phi + j\,I\sin\phi \quad \text{.................} \quad (3-36)$$

$$\left|\dot{I}\right| = \sqrt{(I\cos\phi)^2 + (I\sin\phi)^2} = I$$

$$\phi = \tan^{-1}\frac{\sin\phi}{\cos\phi}$$

وتكون ϕ زاوية موجبة أي أن التيار متقدم على الضغط بهذه الزاوية، شكل (3–19).

القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة والقدرة الظاهرية:



شكل(٢٠ – ٣ب)

يتضح بمراجعة الشكل (20– 3ب)، أن التيار يتكون من مركبتين: (أولاً) المركبة $I\cos\phi$ وهي اتفاق مرحلي مع الضغط E، ويطلق على هذه المركبة اسم المركبة الفعالة للتيار، وذلك لأنها تعطي القدرة الفعالة في الدائرة عند ضربها في قيمة الضغط E. فإذا رمزنا للقدرة الفعالة في الدائرة بالرمز P نجد أن:

$$P = E \times I\cos\phi \quad \text{وات}$$

$$= EIa \quad \text{..............} \quad (3-37) \quad \text{وات}$$

حيث Ia ترمز للمركبة الفعالة للتيار وقيمتها $I \cos \Phi$.

(ثانياً) المركبة $I \sin \Phi$ وهي عمودية على الضغط، ويرمز لها بالرمز Ir، وتسمى هذه المركبة بالمركبة غير الفعالة للتيار، وهي لا تعطي أية قدرة فعالة في الدائرة، ولذلك يطلق على حاصل ضرب Ir في E القدرة غير الفعالة في الدائرة، ويرمز لها بالرمز Pr، وتكون وحدتها الفولت أمبير.

$$P_r = EI_r = EI \sin \phi \quad \text{.................... } (3-38)$$

بتربيع المعادلتين (37 – 3)، (38 – 3) وجمعها ينتج أن:

$$P^2 + P_r^2 = (EI \cos\phi)^2 + (EI \sin \phi)^2$$

$$= (EI)^2$$

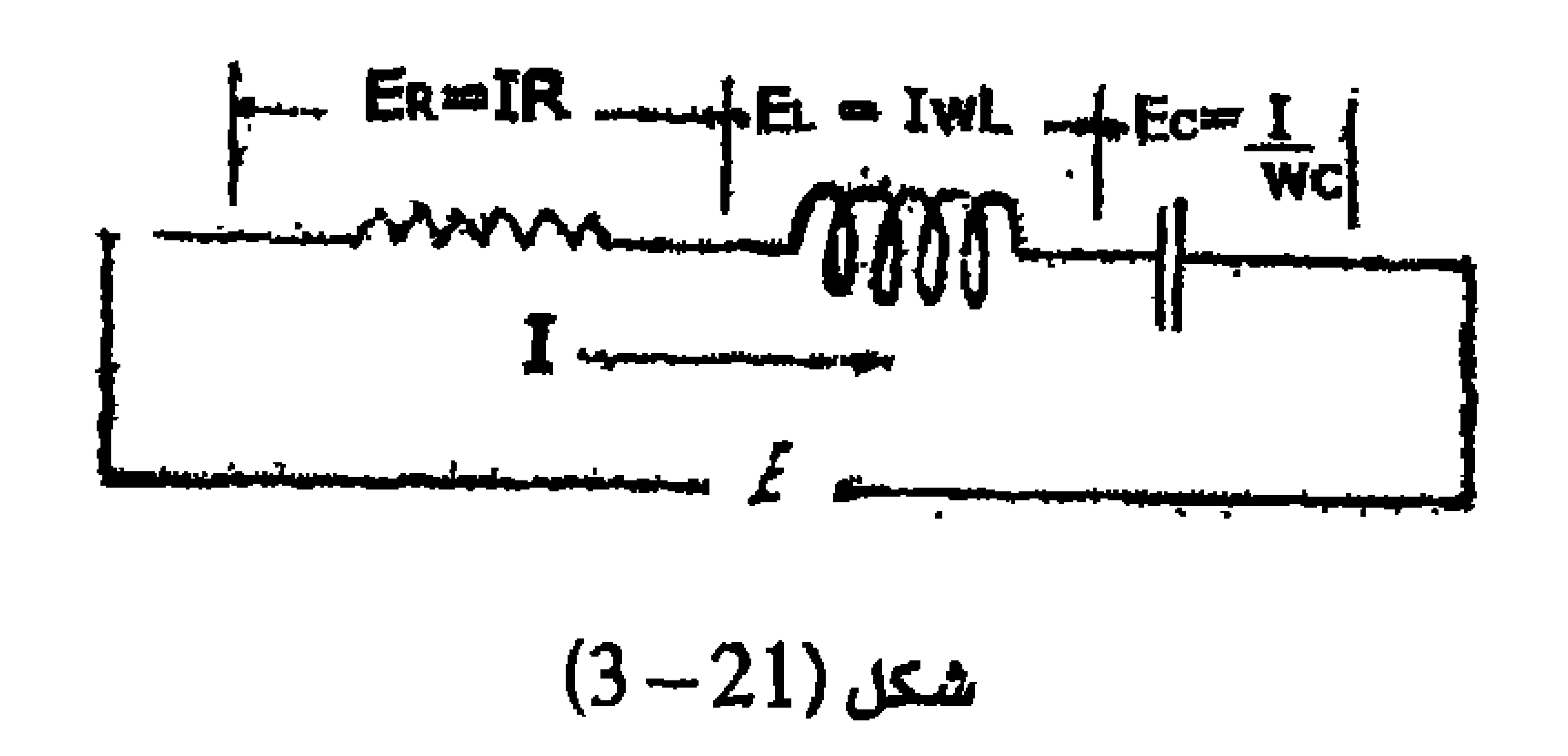
$$\therefore \quad \sqrt{P^2 + P_r^2} = EI$$

ويطلق على حاصل الضرب EI اسم القدرة الظاهرية ووحدتها الفولت أمبير أيضاً، وإذا رمزنا لها بالرمز Pa نجد أن:

$$P_a = \sqrt{P^2 + P_r^2} \quad \text{.......................... } (3-39)$$

دائرة التوالي العامة المقاومة والملف والمكثف متصلة على التوالي:

يبين شكل (21 – 3) قوة دافعة كهربية مترددة قيمتها الفعالة E فولت موصلة إلى دائرة تحتوي على مقاومة R أوم وممانعة حثية $XL = wL$ أوم وممانعة سعوية $X_c = \frac{1}{\omega C}$ أوم موصلة معاً على التوالي. إذا كانت القيمة الفعالة للتيار الذي يمر في هذه الدائرة هي I أمبير يلزم ثلاث مركبات للضغط لتمرير التيار في الدائرة. هذه المركبات هي: شكل (21 – 3).



شكل (21 – 3)

أ. المركبة ER=IR لتمرير التيار في المقاومة، وتكون في اتفاق مرحلي مع التيار.

ب. المركبة EL=IwL لتمرير التيار في الملف، وتكون متقدمة على التيار بزاوية 90°.

ج. المركبة $E_c = \frac{I}{\omega C}$ لتمرير التيار في المكثف، وتكون متأخرة على التيار بزاوية 90°

ومجموع هذه المركبات الثلاث يعطي الضغط E حيث:

$$E = Iz = \sqrt{E^2_R + (E_L - E_C)^2}$$

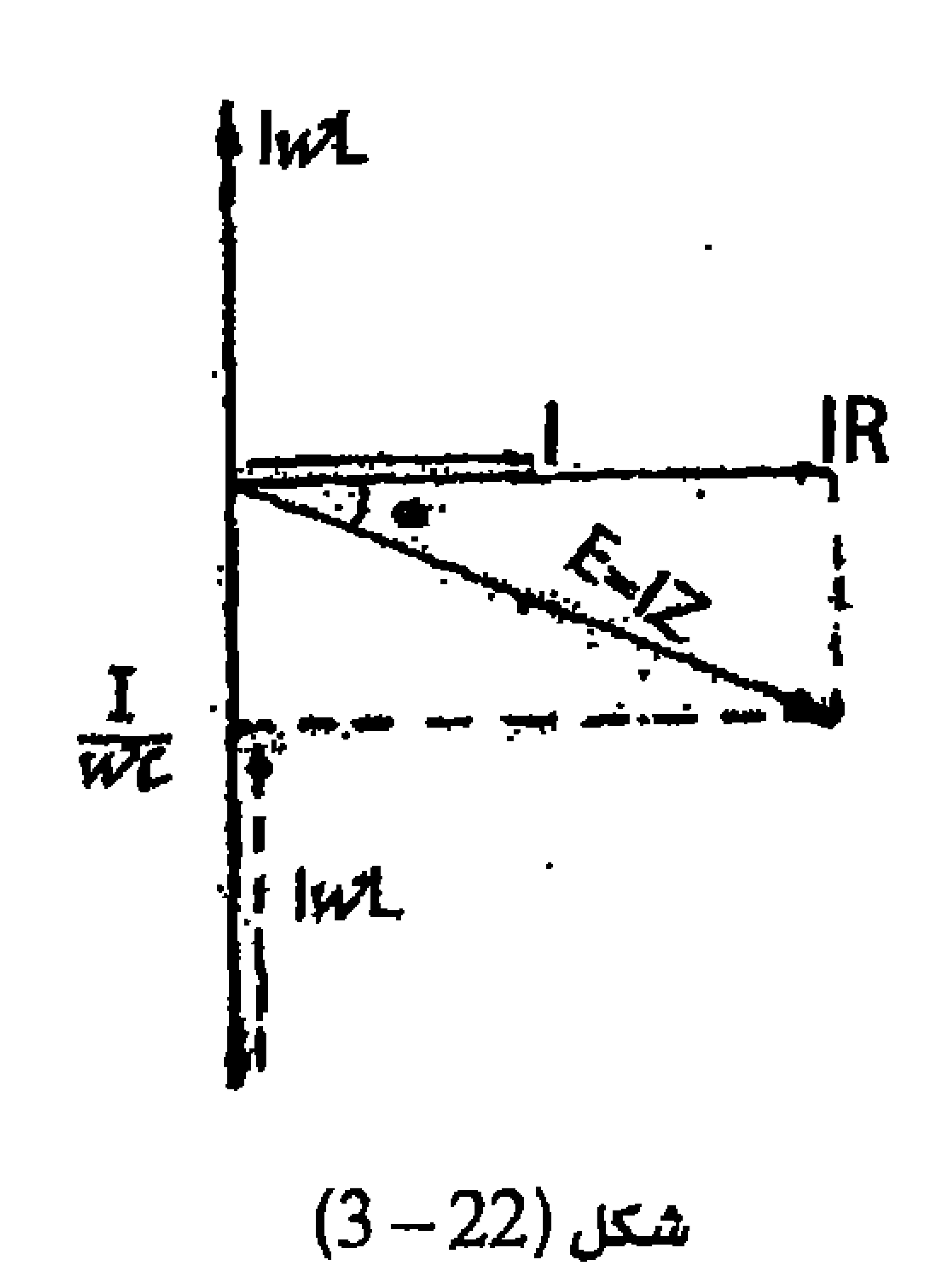
$$= I\sqrt{R^2 + (\omega L \quad \frac{1}{\omega C})^2}$$

$$(3-40) \ldots\ldots\ldots\ldots \quad I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

$$(3-41) \ldots\ldots\ldots\ldots \quad \phi = \tan^{-1} \frac{\frac{1}{\omega C} - \omega L}{R}$$

$$z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

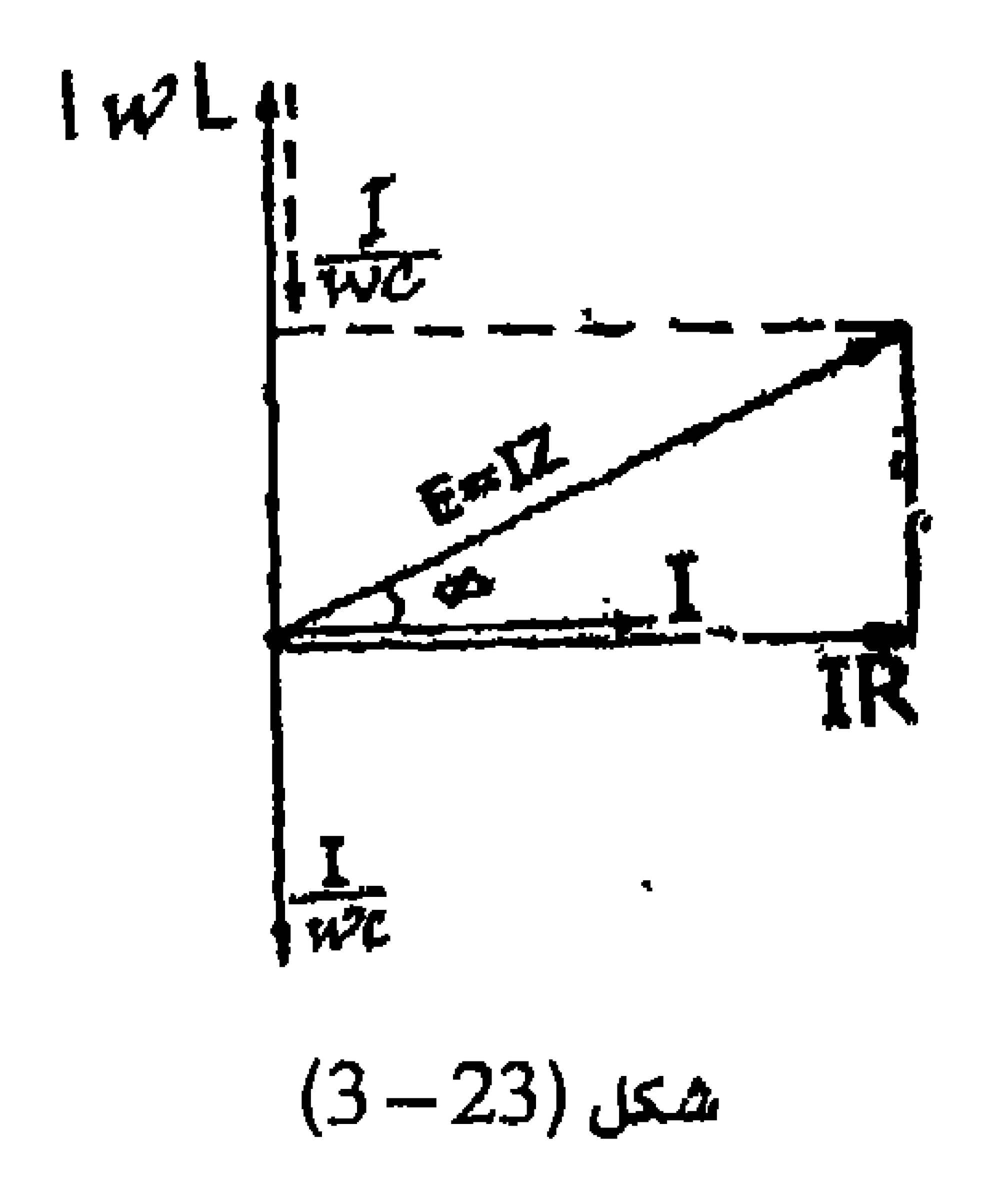
توجد ثلاث أحوال مختلفة بالنسبة للنتيجة التي نحصل عليها من كل من المعادلتين (40 – 3)، (41 – 3) الا وهي:



شكل (22 – 3)

أ. عندما تكون الممانعة السعوية XC أكبر من الممانعة الحثية XL ($\frac{1}{\omega C} > \omega L$) يكون التيار متقدماً على الضغط، اي أن الزاوية Φ تكون موجبة، ويتضح هذا جلياً من المعادلة (41– 3)، ويقال في هذه الحالة أن الدائرة ذات معاوقة سعوية، ويمكن أن نعتبر وجود ممانعة سعوية مكافئة فقط مقدارها (XC–XL) مع اختفاء XL من الدائرة، ويمكن تبيين هذه الاعتبارات جميعها بمراجعة شكل (22– 3).

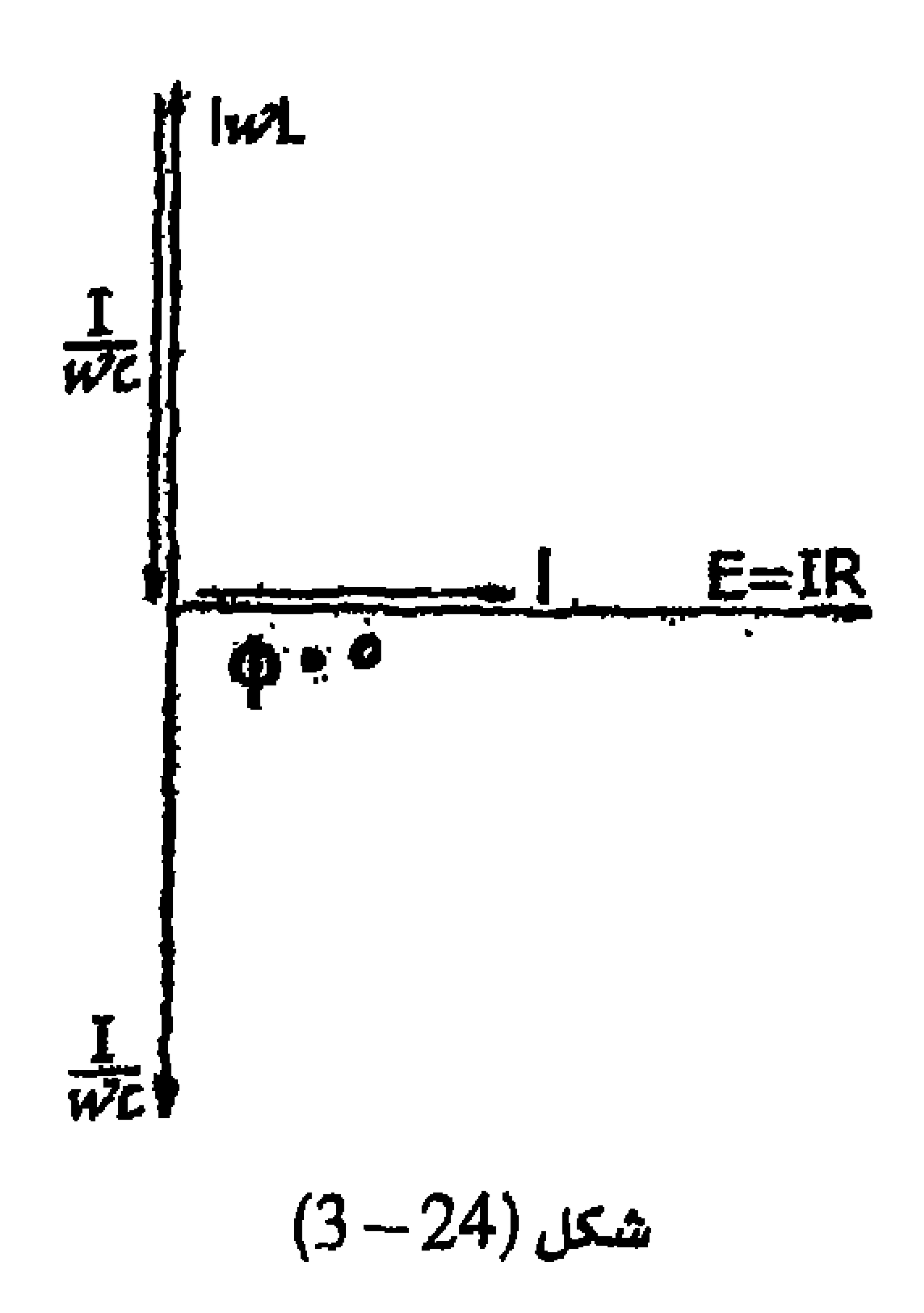
ب. عندما تكون الممانعة الحثية XL أكبر من الممانعة السعوية XC ($\omega L > \frac{1}{\omega C}$) يكون التيار متأخراً على الضغط، ويتضح بمراجعة المعادلة (41– 3) أن الزاوية Φ تكون سالبة في هذه الحالة. ويقال للدائرة أنها ذات معاوقة حثية، ويمكن أن نعتبر وجود ممانعة حثية مكافئة فقط في الدائرة مقدارها (XL – XC) مع اختفاء XC من الدائرة وتتضح هذه الاعتبارات جميعها بمراجعة شكل (22– 3).



شكل (23 – 3)

ج. عندما تتساوى كل من XL، XC: تكون المعاوقة في هذه الحالة أصغر ما يمكن ($XL - XC = 0$)، وتكون قيمتها مساوية لقيمة المقاومة R فقط. تكون قيمة التيار الذي ينتج في الدائرة أكبر ما يمكن $I = \frac{E}{R}$، كما أنه يكون في توافق مرحلي مع الضغط، شكل (24– 3) ($\phi = \tan^{-1} 0 =$ صفر)، ويقال للدائرة في هذه الحالة إنها في حالة رنين، وتكون القدرة الفعالة في الدائرة أكبر ما يمكن وذلك لأن قيمة التيار أكبر ما يمكن، كما أن معامل القدرة $\cos\phi$ يساوي الوحدة، وهذه هي قيمة النهاية العظمى له، وتكون قيمة القدرة غير الفعالة مساوية للصفر.

ويلاحظ أن هبوط الضغط على الملف IXL يساوي هبوط الضغط على المكثف IXC بينما يكون هبوط الضغط على المقاومة IR مساوياً لضغط الينبوع E.



شكل (24 – 3)

ونظراً لأن الضغط على طرفي الملف IXL يساوي الضغط على المكثف IXC ويضاده في الاتجاه، فإن كلاً منهما يلاشي الآخر، وقد تكون قيمة كل منهما في هذه الحالة كبيرة جداً بالنسبة لضغط الينبوع. وتستخدم هذه الطريقة في دوائر الراديو للحصول على ضغوط كبيرة على أطراف الملفات والمكثفات باستخدام ينابيع ذات ضغوط محدودة القيمة.

يتضح مما سبق أن شرط الحصول على حالة رنين في الدائرة أن تكون XC مساوية لـ XL اي أن:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

$$\therefore \quad 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$\therefore \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad \text{.............. (3 – 42)}$$

يمكن تحقيق الشرط الذي تنص عليه المعادلة (42 – 3) بتغيير قيمة تردد الينبوع لتتحقق المساواة المطلوبة، أو بتغيير قيمة أي من L أو C أو كليهما معاً، مع ثبات قيمة التردد، وذلك للحصول على المساواة المطلوبة في المعادلة (42– 3).

تستخدم في دوائر الراديو ذات سعة متغيرة، بحيث يمكن تعديل سعتها للحصول على الرنين المطلوب.

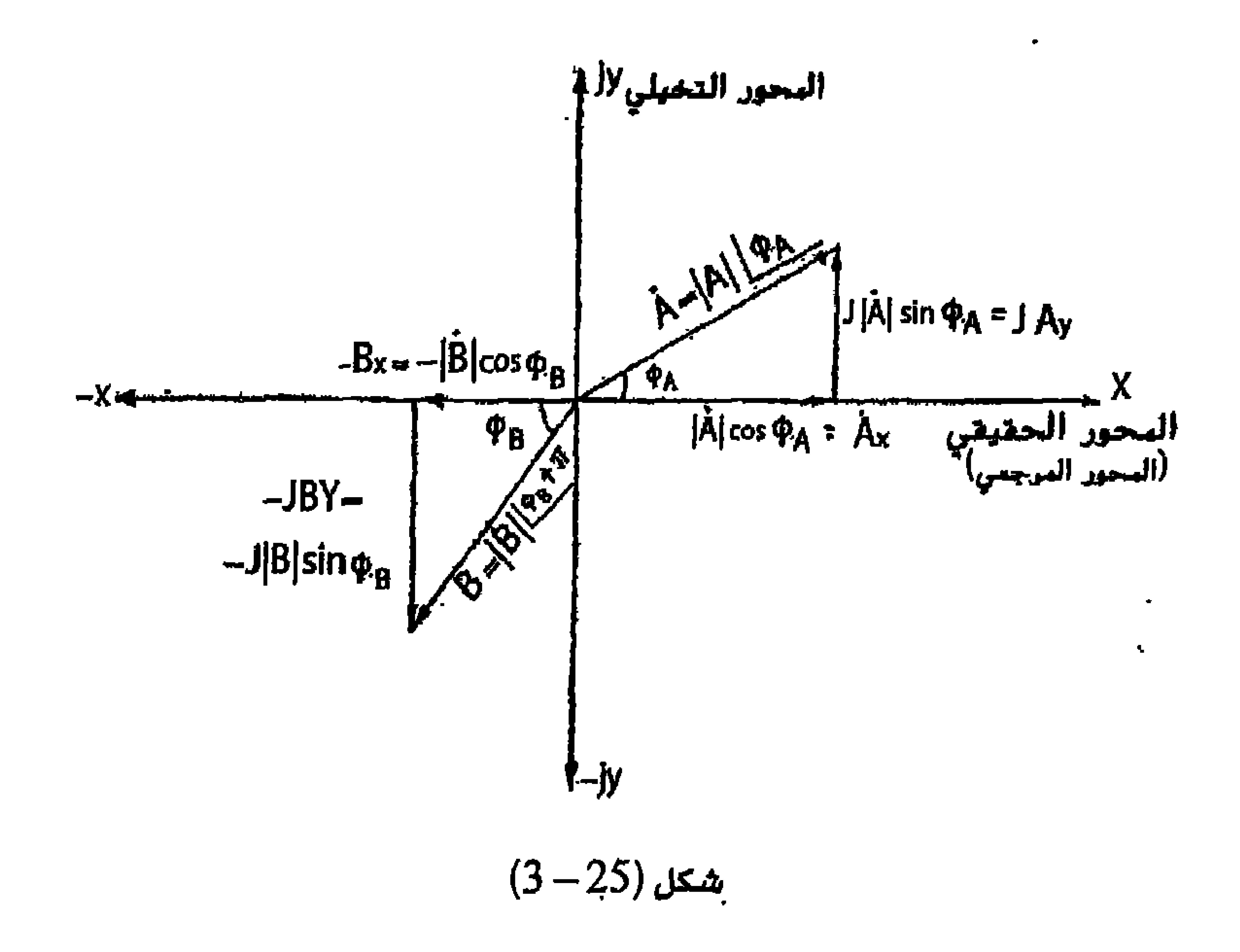
حل دوائر التيار المتردد باستخدام الكميات التخيلية:

لا يحتاج حل دوائر التيار المتردد إلى استخدام قواعد أو قوانين جديدة، وإنما نستخدم نفس القوانين التي استعملناها في حل دوائر التيار المستمر، مثل قانون أوم، وقانوني كيرشوف، وقاعدة ثيفنن، وغيرها، وذلك مع إحلال المعاوقة محل المقاومة عند تطبيق جميع هذه القوانين والقواعد. ولكي يعطي الحل الحدود المطلوبة على شكل كميات موجهة، يجب استخدام الضغوط والتيارات والمعاوقات على شكل كميات موجهة، وذلك باستعمال الكميات التخيلية: ولما كان من الضروري اختيار محور مرجعي أو أصلي تعتبر عنده $wt=0$، وتنسبب إليه جميع زوايا الاختلاف المرجعي، فمن الأوفق اعتبار ضغط الينبوع مطابقاً على هذه المحور، ويعبر عنه في هذه الحالة على شكل كمية حقيقية، كما أن جميع زوايا الاختلاف المرجعي التي تنتج في الحل تكون على هذه الأساس مع ضغط الينبوع.

من الواضح أننا سوف نحتاج إلى استخدام قواعد حساب الكميات التخيلية على أوسع نطاق في حل دوائر التيار المتردد. ويستحسن لذلك أن نشير بسرعة إلى القواعد العامة في حساب الكميات التخيلية، ألا وهي قواعد جمع وطرح وضرب وقسمة الكميات التخيلية.

تتكون الكمية التخيلية من حدين، الحد الحقيقي، والحد التخيلي، وهو الذي يكون مضروباً في j (تستخدم بدلا من i التي تساوي $\sqrt{-1}$، التي تستخدم عادة في حساب الكميات التخيلية حتى لا يحدث التباس مع i التي ترمز للتيار). يمكن التعبير عن أي كمية موجهة على شكل كمية تخيلية، وذلك بطريقتين: (أولاً) وضع المركبة الأفقية للكمية الموجهة حداً حقيقياً ووضع المركبة الراسية للكمية الموجهة حداً تخيلياً في الكمية التخيلية، وذلك مع مراعاة الإشارة بالنسبة للمحورين الحقيقي والتخيلي. مثال ذلك نفرض أن هناك كميتين موجهتين

$\dot{A}$، $\dot{B}$ لكل منهما طول واتجاه معينين. إذا رسمنا هذين الموجهين من نقطة الأصل في المستوى التخيلي الذي يحتوي على محاور كرتيزية بحيث تمثل الحدود الحقيقية على المحور الأفقي والحدود التخيلية على المحور الرأسي، شكل (25– 3)، يمكن التعبير عن الكميتين الموجهتين $\dot{A}$، $\dot{B}$ على النحو التالي:



شكل (25 – 3)

$$\left.\begin{cases}\dot{A} = |\dot{A}|\cos\phi_A + j\,|\dot{A}|\,\sin\phi_A \\ \dot{B} = -\,|\dot{B}|\cos\phi_B - j\,|\dot{B}|\,\sin\phi_B\end{cases}\right. \quad (3-43)\ ....$$

حيث $|\dot{B}|$، $|\dot{A}|$، تعبران عن مقدار كل من الكميتين الموجهتين $\dot{A}$، $\dot{B}$ على الترتيب، وإذا عبرنا عن المركبة الأفقية بوضع الدليل X والمركبة الرأسية بوضع الدليل Y نجد أن:

$$\left.\begin{cases}\dot{A} = A_x + j\ A_y \\ \dot{B} = -\ B_x - jB_y\end{cases}\right. \quad (3-44)\ ....$$

(ثانياً) ويمكن الحصول على مقدار كل من $\dot{A}$، $\dot{B}$ من المركبتين الأفقية والرأسية لكل منهما على النحو الآتي:

$$|\dot{A}| = \sqrt{A^2_x + A^2_y}$$

$$|\dot{B}| = \sqrt{B^2_x + B^2_y}$$

(ثالثاً) يمكن التعبير عن الكمية الموجهة أو الكمية التخيلية بتحديد مقدارها والزاوية التي تصنعها مع المحور الحقيقي أو المحور المرجعي، على النحو الآتي:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{A} = |\dot{A}| \underline{|\phi_A} \\ \dot{B} = |\dot{B}| \underline{|\phi_B + \pi} \end{array} \right. \quad \text{.........} (3-45)$$

ويلاحظ أنه يمكن التعبير عن الكمية الموجهة بالصورة المبينة في المعادلة (43– 3)، أي بدلالة المركبتين الأفقية على المحور الحقيقي، والرأسية على المحور التخيلي. أو بالصورة المبينة في المعادلة (45– 3)، أي بدلالة القيمة العددية والزاوية التي تصنعها مع المحور المرجعي. هذا ويمكن الحصول على أي منها من الصورة الأخرى. مثال ذلك الكمية الموجهة $\dot{A} = -8 + j6$ على صورة المعادلة (43– 3) يمكن الحصول عليها في صورة المعادلة (45– 3) على النحو الآتي:

$$|\dot{A}| = \sqrt{A^2_x + A^2_y} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10$$

$$\phi_A = \tan^{-1} \frac{6}{-8} = \pi - \tan^{-1} \frac{6}{8}$$

$$= \pi - 36.5^\circ = 143.5^\circ$$

$$\dot{A} = 10 \underline{|143.5^\circ}$$

جمع وطرح الكميات التخيلية:

عند جمع أو طرح الكميات التخيلية، تجمع حدودها الحقيقية جبرياً وتجمع حدودها التخيلية أيضاً جبرياً، ويلاحظ أن عمليتي الجمع والطرح تحتاجان إلى وضع الكميات التخيلية في صورة المعادلة (43– 3). فمثلاً:

$$\left\{\begin{array}{l} \dot{A}+\dot{B}=(A_x-B_x)+j(A_y-B_y) \\ \dot{A}-\dot{B}=(A_x+B_x)+j(A_y+B_y) \end{array}\right. \quad \ldots (٣-٤٦)$$

ضرب وقسمة الكميات التخيلية:

عند ضرب كميتين تخيليتين معاً، تضرب القيمتان العدديتان وتجمع الزاويتان. وعند قسمة كمية تخيلية على أخرى تقسم قيمة الكمية الأولى على قيمة الكمية الثانية وتطرح الزاوية الثانية من الأولى.

فمثلا:

$$(3-47) \ldots\ldots\ldots \quad \dot{A}\times\dot{B}=|\dot{A}|\times|\dot{B}|\,\underline{|\,\varphi_A+\varphi_B+\pi}$$

$$\frac{\dot{A}}{\dot{B}}=\frac{|\dot{A}|}{|\dot{B}|}\,\underline{|\,\varphi_A-\varphi_B-\pi}$$

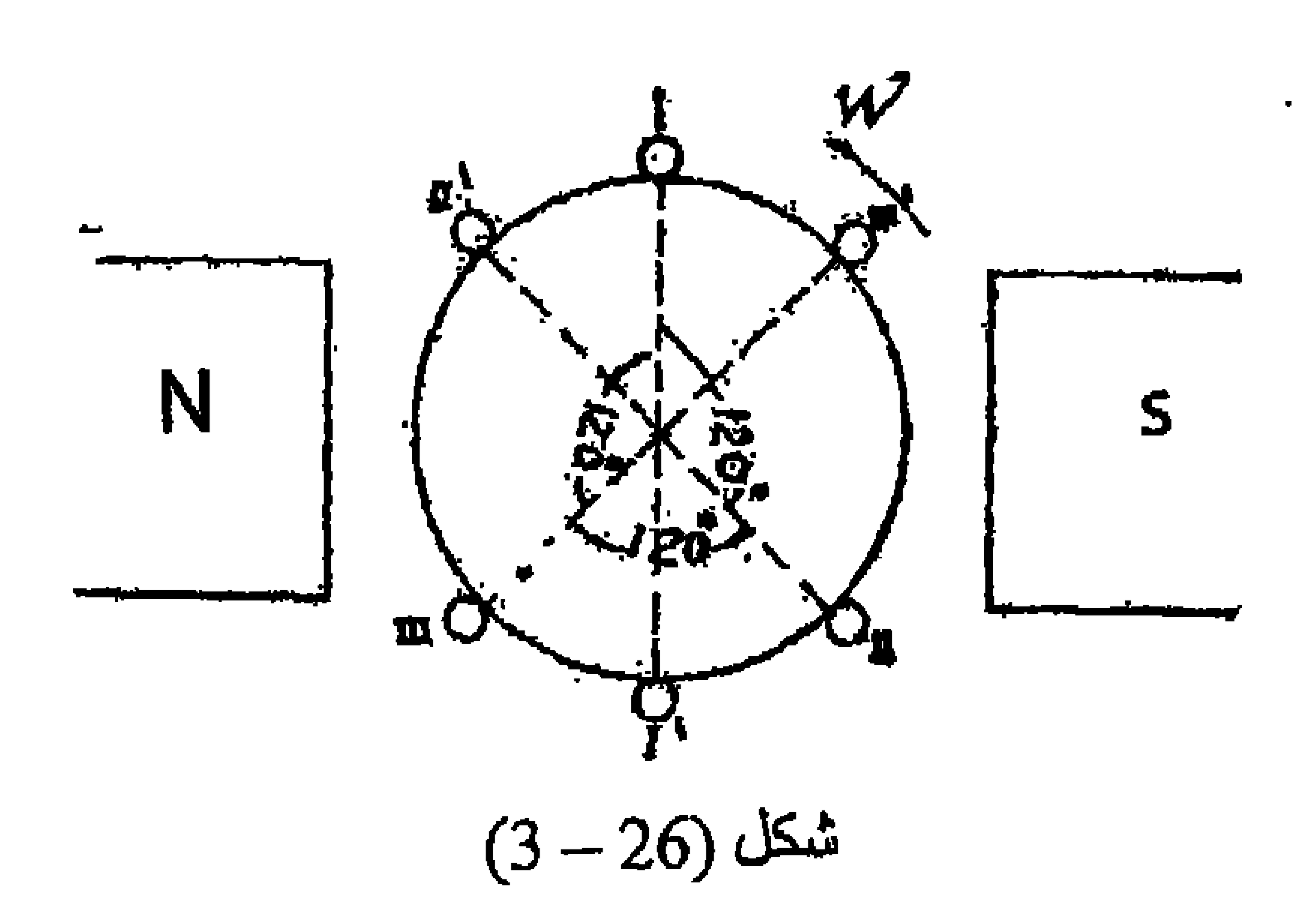
ويلاحظ أنه يفضل وضع الكميات التخيلية في صورة المعادلة (45– 3) عند إجراء عمليتي الضرب والقسمة.

المجموعات ثلاثية المراحل:

إذا أضفنا إلى ملف المولد المبين في شكل (1– 3) ملفين آخرين من نفس النوع بحيث يكون وضعهما على المنتج متماثلاً مع وضع الملف الأول، وتكون الملفات الثلاثة موزعة على محيط المنتج بصورة منتظمة، كما في شكل (26– 3) نجد أن الزاوية بين كل جانب من جوانب الملفات الثلاثة المتناظرة (III, II, I) أو (III', II', I') هي $\frac{2\pi}{3}$ أو 120°. عند دوران المنتج تتولد في الملفات الثلاثة قوى دافعة كهربية تتوقف قيمة كل منها على موضع الملف بالنسبة للمجال المغناطيسي. إذا جعلنا تحديد موضع الملفات بدلالة الزمن كما فعلنا في حالة ملف المولد، وذلك باعتبار أن موضع جانب الملف I عند لحظة الصفر $(t = 0)$ يكون عند خط التعادل، نجد أن قيمة القوة الدافعة الكهربية المتولدة في الملف $1 - 1'$ بدلالة الزمن هي:

$$e_1 = E_m \sin \omega t \qquad (3 - 48)$$

حيث Em هي النهاية العظمى لقيمة القوة الدافعة الكهربية، وهي تنشأ في الملف عندما يكون الجانب I للملف على المحور القطبي تحت القطب الشمالي. والجانب I' على نفس المحور تحت القطب الجنوبي. ونظراً لأن الملف $II - II'$ سوف يمر أثناء دوران المنتج بنفس الأوضاع التي يمر بها الملف $I - I'$، ولكنه متأخر عنه (بالنسبة لاتجاه الدوران) بزاوية مقدارها



شكل (26 – 3)

120° (بالدرجات الكهربية) فإن قيمة القوة الدافعة الكهربية المتولدة في الملف II' – II سوف تمر بنفس التغيرات التي تمر بها القوة الدافعة الكهربية e_1 وذلك بعد 120° ابتداءاً من وضع الصفر للملف I' – I. وفي هذه الحالة يمكن التعبير عن القوة الدافعة الكهربية e_2 بالمعادلة:

$$= Em \sin (wt - 120) \quad \text{.......................} \quad (3-49)$$

يمكن بنفس الطريقة التعبير عن القوة الدافعة الكهربية e_3 بالمعادلة:

$$e_3 = E_m \sin (\omega t - 240^\circ) \quad \text{.......................} \quad (3-50)$$

$$= E_m \sin (\omega t + 120^\circ)$$

وتكون النهاية العظمى لقيمة القوة الدافعة الكهربية Em واحدة بالنسبة للملفات الثلاثة، وذلك لأن أطوال الموصلات فيها متساوية، كما أنها تدور في نفس المجال المغناطيسي وبنفس السرعة.

ونظراً لأن القوى الدافعة الكهربية الثلاث تتكون على ثلاث مراحل مختلفة وتفصل بين هذه المراحل الزاويتان المرحليتان 120°، 240°، يطلق عليها قوى دافعة كهربية.

شكل (3 – 27)

متماثلة، ثلاثية المراحل، كما يطلق على المولد الذي ينتجها اسم مولد ثلاثي المراحل. ومولدات التيار المتردد هي في أغلب الأحيان مولدات ثلاثية المراحل.

يمكننا تمثيل القوى الدافعة الكهربية ثلاثية المراحل بثلاثة موجهات متساوية في الطول (يمثل طول كل منها $\frac{E_m}{\sqrt{2}}$ أي القيمة الفعالة للضغط)، ويفصل بين كل اثنين منها °120. يبين شكل (27– 3أ) القوى الدافعة الكهربية الثلاث كما تمثل على المحاور الكرتيزية على حسب المعادلات (48 إلى 50– 3)، ويبين شكل (27– 3ب) نفس هذه القوى ممثلة على مخطط المتجهات، وإذا اعتبرنا أن E1 تنطبق على المحور المرجعي، أو اتخذناها مرجعاً نجد أن:

$$\left\{\begin{aligned}
\dot{E}_1 &= E_{ph} \angle 0 = E_{ph} \\
\dot{E}_2 &= E_{ph} \angle -120^\circ \\
&= E_{ph} \cos -120 + jE_{ph} \sin -120 \\
&= -\tfrac{1}{2} E_{ph} - j \tfrac{\sqrt{3}}{2} E_{ph} \\
&= -0.5\ E_{ph} - 0.866\ E_{ph} \\
\dot{E}_3 &= E_{ph} \angle -240^\circ = E_{ph} \angle 120^\circ \\
&= E_{ph} \cos 120 + j\, E_{ph} \sin 120 \\
&= -\tfrac{1}{2} E_{ph} + j \tfrac{\sqrt{3}}{2} E_{ph} \\
&= -0.5\ E_{ph} + j\ 0.866\ E_{ph}
\end{aligned}\right. \qquad (3-51)$$

حيث Eph هي القيمة الفعالة للقوة الدافعة الكهربية في كل ملف أو لكل مرحلة، وهي واحدة من الملفات أو المراحل الثلاث وتساوي $\frac{E_m}{\sqrt{2}}$. وتسمى Eph بالضغط المرحلي، أو القوة الدافعة الكهربية لكل مرحلة.

لكي يمكن الحصول على القوى الدافعة الكهربية الثلاث بحالتها الراهنة يجب استخدام ست حلقات انزلاقية على محور الدوران، بحيث توصل كل اثنتين منها بملف من الملفات الثلاث بنفس الطريقة التي اتبعت مع ملف المولد المبين في شكل (1 – 3). فإذا وصل كل ملف من الملفات الثلاثة مع دائرة خارجية تحتوي على معاوقة مقدارها $\dot{Z} = R + jX_L = |\dot{Z}| \underline{|\phi}$ ، نحصل على تيارات متماثلة في المراحل الثلاث مقاديرها هي:

$$\left\{\begin{array}{l} i_1 = I_m \sin(\omega t - \phi) \\ i_2 = I_m \sin(\omega t - 120 - \phi) \\ i_3 = I_m \sin(\omega t - 240 - \phi) \\ \quad = I_m \sin(\omega t + 120 - \phi) \end{array}\right. \qquad (3-52)$$

$$\left\{\begin{array}{l} \phi = \tan^{-1} \frac{X_L}{R} \quad , \\ I_m = \frac{E_m}{|\dot{Z}|} = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \end{array}\right. \qquad (3-53)$$

وبذلك نحصل على ثلاثة تيارات متساوية في المقدار بين كل اثنين منها أيضاً 120°، أي تيارات متماثلة ثلاثية المراحل. ويكون كل تيار متأخر على الضغط في نفس المرحلة بزاوية مقدارها $\phi = \tan^{-1} \frac{X_L}{R}$. إذا كانت القيمة الفعالة للتيار في كل مرحلة هي Iph، يطلق على Iph التيار المرحلي، أو التيار في كل مرحلة، وتكون قيمته هي:

$$(3-54) \qquad I_{ph} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{E_m}{\sqrt{2}\sqrt{R^2+X^2_L}} = \frac{E_{ph}}{\sqrt{R^2+X^2_L}}$$

مثال(1):

A series cirnuit, which consists of a resistance of 80 ohms, an inductance of 2 henrys and a capacitance of 8 micro – farad is connected across an alternating current supply of 380 V. The frequency is 50 c/a.

i. Find the value of the currents the power factor, the active power and the reactive power.
ii. Find the change in the value of the capacitance necessary to produce resonance and find the current in this case.

$$X_L = 2 \times 314 = 628\ \Omega$$

$$X_C = \frac{10^6}{8 \times 314} = 397\ \Omega$$

$$X_L - X_C = 231\ \Omega \qquad (X_L > X_C \text{ حثية لأن})$$

$$I = \frac{380}{100\sqrt{0.64 + 5.32}} = \frac{380}{244} = 1.556 \text{ amps,}$$

$$\cos\phi = \frac{R}{Z} = \frac{80}{244} = 0.328$$

$$P_a = 380 \times 1.556 \times 0.328 = 194 \text{ Watts}$$

$$P_r = 380 \times 1.556 \times 0.946 = 559 \text{ Volt. ampere}$$

لكي يحدث الرنين يجب أن تكون المانعة السعوية X'C مساوية للمانعة الحثية XL أي ان X'C = 682 وفي هذه الحالة يجب أن تكون سعة المكثف C' بدلا من 8 ميكروفاراد هي:

$$C' = \frac{10^6}{314 \times 628} = 5.06\ \mu F$$

ويكون التيار I' في حالة الرنين في توافق مرحلي مع الضغط وقيمته هي:

$$I' = \frac{380}{80} = 4.75\ \text{amps.}$$

مثال(2):

An impedance z is composed of a resistance of 20 ohms, an inductance of 0.2 heury and a condenser of 37.4 micro – farads, connected in series across a 220 V, 50 c/a alternating current supply. Find:

a. The current and its phase angle.
b. The real and apparent powers.
c. The capacity of the condenser to be connected in parallel with the original condenser to produce resonance in the circuit.

If 3 similar impedances, each having the above given values, are connected in data across a 3 phase, 440 V, 50 c/s of a supply.

Find:

d. The line and phase currents.
e. The reading of two watt – meters connected to measure the total power.

a) $X_L = 0.2 \times 314 = 62.8\ \Omega$

$$X_C = \frac{10^6}{37.4 \times 314} = 85.2\ \Omega$$

$(X_C - X_L) = 22.4\ \Omega$ $\quad$ ($X_C > X_L$ سعوية لأن)

$$I = \frac{220}{\sqrt{400 + 500}} = 7.33 \text{ amps}$$

$$\tan\phi = \frac{22.4}{20} = 1.12 \quad \therefore \quad \phi = 48^0 \, 17'$$

$$P_a = 220 \times 7.33 \times 0.6654 = 1075 \quad \text{Watts}$$

$$P_r = 220 \times 7.35 \times 0.7464 = 1203 \quad \text{Volt-amp.}$$

عند الرنين نجد أن

$$X'_C = 62.8 \quad \Omega$$

$$C' = \frac{10^6}{62.8 \times 314} = 50.6 \quad \mu F$$

وهذا ممكن بإضافة مكثف سعته C_2 على التوازي مع المكثف الأصلي الذي سعته C_1 بحيث يكون $C'=C_2+C_1$.

$$C_2 = 50.6 - 37.4 = 13.2 \quad \mu.F.$$

b) $I_{ph} = \frac{440}{30} = 14.66$ amps.

$$I_L = \sqrt{3} \; I_{ph} = 14.66 \times \sqrt{3} = 25.4 \quad \text{amps.}$$

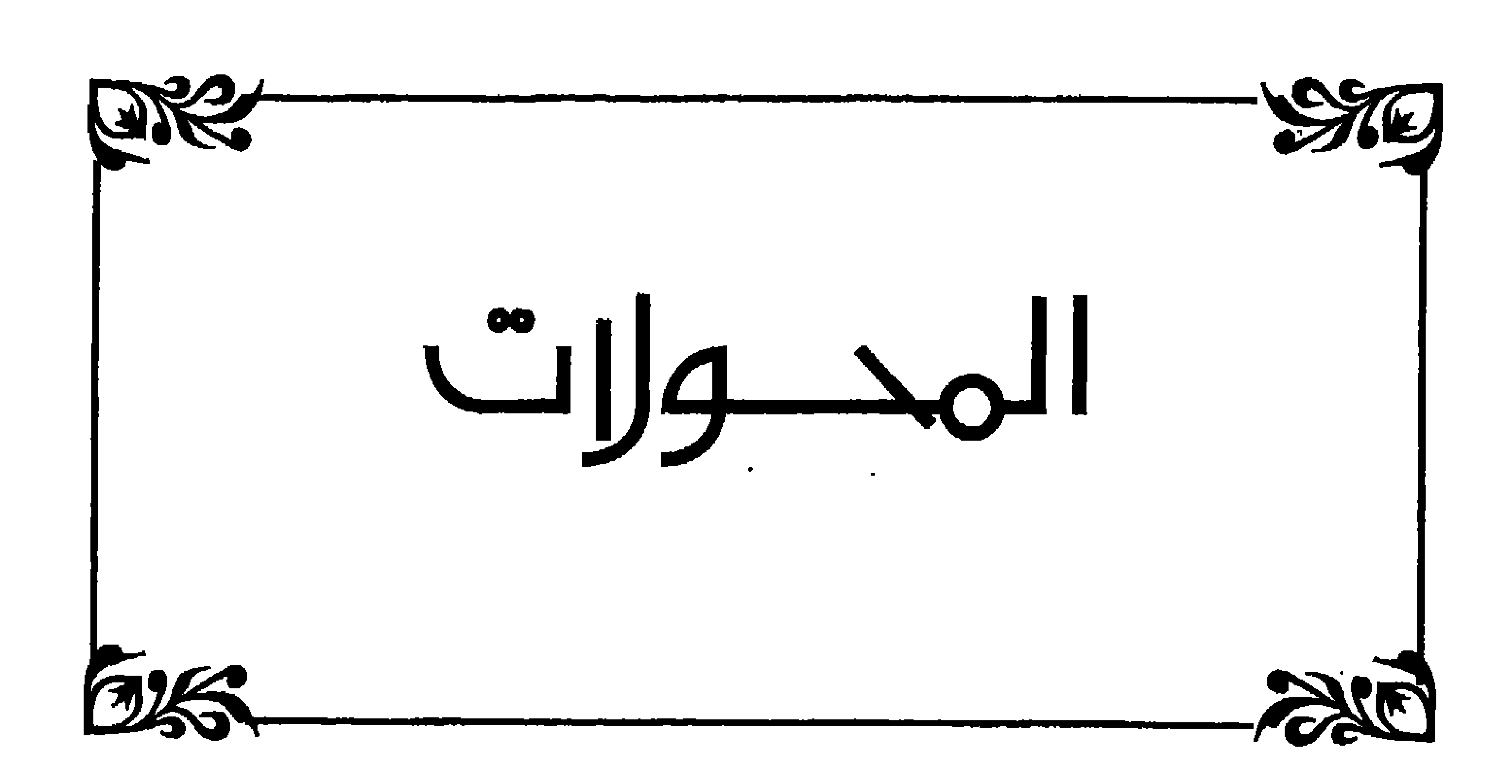
$$W_1 = E_L \; I_L \cos(30 + \phi)$$

$$= 440 \times 25.4 \times 0.2031 = 2266 \quad W$$

$$W_2 = E_L \; I_L \cos(30 - \phi)$$

$$= 440 \times 25.4 \times 0.9495 = 10600 \quad W$$


الفصل الثالث


المحـــولات

المحولات

الدوائرة المغناطيسية:

الدائرة المغناطيسية هي مسار التدفق (الفيض) المغناطيسي، وهو مشابه تماماً للتيار الكهربائي الذي يقدم مسار لمرور التيار الكهربائي. المحولات والآلات الكهربائية والعديد من الأجهزة الكهروميكانيكية الأخرى، تستخدم جميعها التيار المغناطيسي.

يعرف الحث المغناطيسي أو كثافة التدفق المغناطيسي B بعلامة القوى.

$$F = B\ell I \qquad (1.13)$$

حيث F، وتقد بالنيوتن (N)، هي القوة التي يشكلها موصل مستقيم طوله $\ell(m)$ (متر واحد) يمر به تيار قدرة I(A) امبير واتجاهها عمودي على خطوط المجال المغناطيسي الذي له كثافة تدفق B(T) بعبارة أخرى، إذا مر بموصل طوله متر واحد، تيار قدره أمبير واحداً، وخضع لقوة قدرها نيوتن واحد عندما يشكل زاوية قائمة مع خطوط التدفق المغناطيسي المتوازية، عندئذ تبلغ كثافة التدفق المغناطيسية تيسلاً واحداً. في حالة التدفق، يمثل الحث المغناطيسي شعاعاً B مقداره B ويوازي خطوط التدفق. إذا كان B متجانساً خلال منطقة ما سطحها A وكان عمودياً في كافة النقاط، على السطح، عندئذ يعطي التدفق المغنطيسي ϕ بالعلاقة:

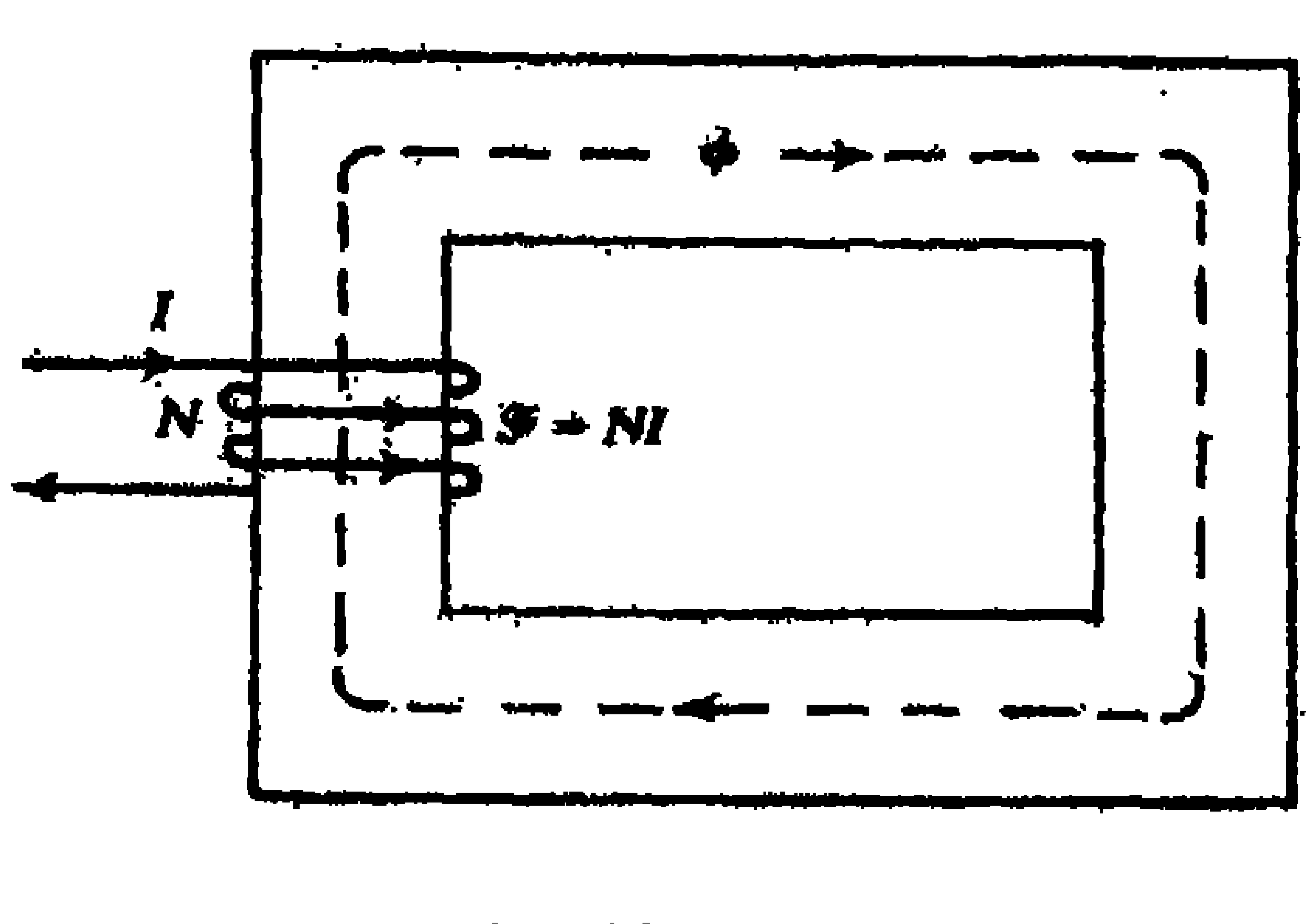
$$\phi = BA \qquad B\frac{\phi}{A} \qquad (2.13)$$

يقاس التدفق المغناطيسي بوحدة تسمى (ويبر) ويرمز لها (Wb) وتبين العلاقة (2.13) أن $1\ T = Wb/m^2$.

ينتج التدفق المغناطيسي عن مصدر. سواء من مغناطيس دائم أو من تيار كهربائي. لقياس مردود التيار الكهربائي في إنتاج مجال مغناطيسي (تدفق)، ندخل تعريفاً هو القوة المحركة المغناطيسية (mmf)، رمزها F، وتعطى بالعلاقة

$$F = NI \qquad (3.13)$$

حيث I هو التيار المار في ملف من n لفة. واحدة القوة F هي أمبير لفة (AT) يبين الشكل 1.13، تخطيطياً، دائرة مغناطيسية فيها تدفق مغناطيسي وقوة محركة مغناطيسية.



الشكل (13– 1)

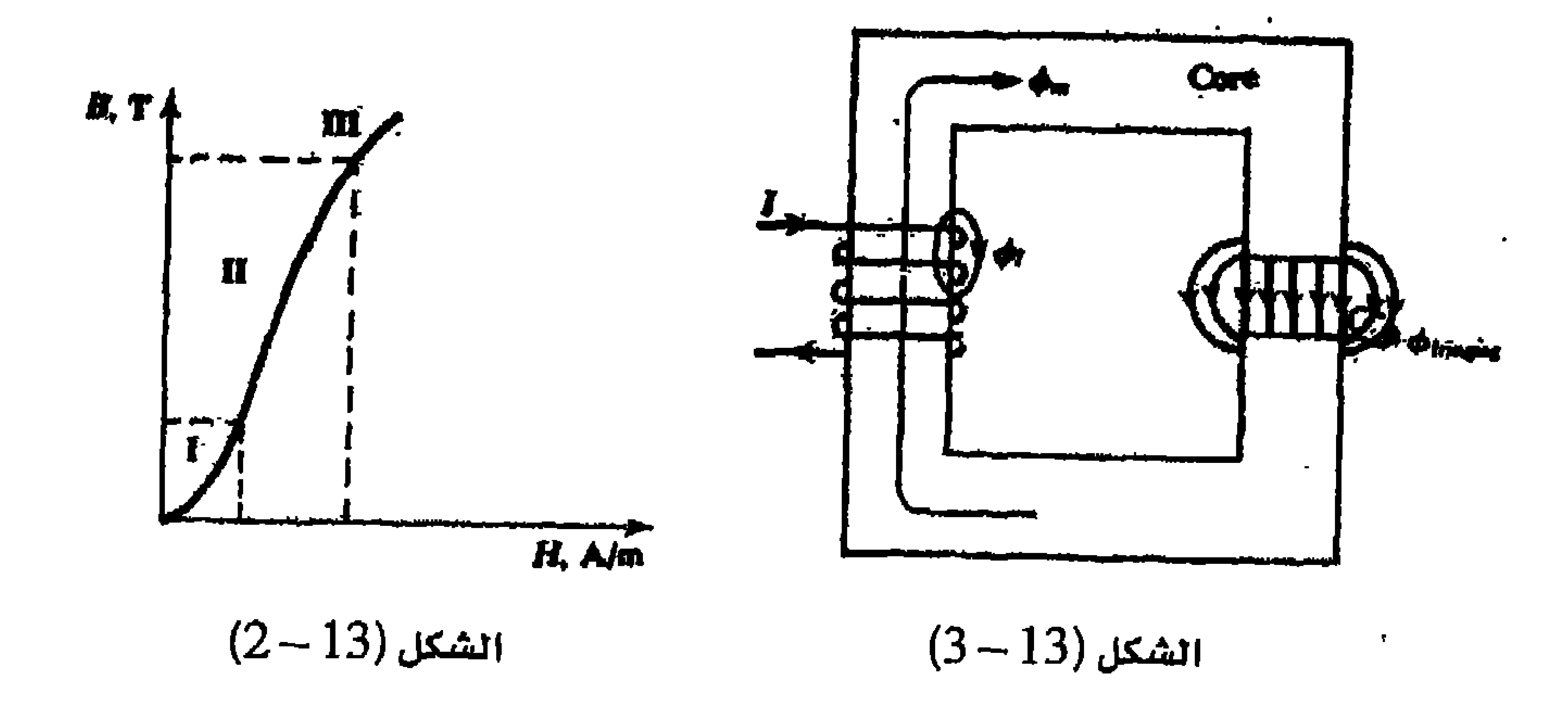
النواة أو القلب (الجزء المركزي) للدائرة المغناطيسية (الذي يشكل محولاً أو آلة كهربائية) يصنع عادة من مادة الحديد (فيريت).

وتتصف علاقة B مع H (شدة المجال المغناطيسي مقيسة بواحدة A/m أو At/m) بمنحن يسمى منحني الإشباع، كما بالشكل 2.13 في المنطقة II، حيث يكون ميل المنحني ثابتاً تقريباً، يمكن أن نكتب:

$$B = \mu H \qquad (4.13)$$

حيث μ تقدر بوحدة (H/m) وتعرف بأنها إنفاذية المادة تعطي قيمتها من أجل الخلاء الحر (أو الهواء) بالشكل:

$$\mu = \mu_0 = 4\pi 10^{-7}\ H/m$$



الشكل (13 – 2)   الشكل (13 – 3)

تخضع الدوائر المغناطيسية لنظير قانون أوم. يبين الجدول 1.13 مقارنة تامة للتشابه بين دوائر المقاومة للتيار dc والدوائر المغناطيسية، حيث ℓ هو الطول وA هو سطح المقطع لمسار التيار الكهربائي في الدائرة الكهربائية، أو لمسار التدفق في الدائرة المغناطيسية. من التماثل، نجد أن قوانين وصل المقاومات على التسلسل والتفرع تنطبق على المعاوقة المغناطيسية (المقاصرة).

الجدول 1.13:

دوائر مقاومات للتيار dc	دوائر مغناطيسية
تيار، I	تدفق (فيض)، ϕ
جهد، V	قوة محركة مغناطيسية، F
موصلية، σ	إنفاذية، μ
قانون أوم، $I = V/R$	$\phi = FR$
مقاومة، $R = \ell/\sigma A$	مُقاصرة، $R = \ell/\mu A$
مواصلة، $G = 1/R$	منافذة، $P = 1/R$

الاختلاف بين دائرة المقاومة للتيار dc، والدائرة المغناطيسية هو عدة أمور: (1) يحصل في المقاومة الكهربائية ضياع قدره I_2R ولا يوجد ضياع $\phi^2 R$ في المعاوقة المغناطيسية، (2) يوجد تسرب خلال التدفق المغناطيسي قدره ϕ_l كما بالشكل 3.13، بينما لا يوجد تسرب مشابه من التيار الكهربائي (خلال مروره في المقاومة). (3) الدوائر المغناطيسية غير خطية حسب المميزة $B - H$ من الشكل 2.13، (4) في الدوائر المغناطيسية التي تحتوي على فتحة هوائية نصادف تبعثراً (تهدبا) في خطوط التدفق (الشكل 3.13)، بينما لا نجد ما يعادل ذلك في الدوائر الكهربائية. يزداد التبعثر مع ازيداد طول الفتحة، مما يزيد سطح المقطع الفعال للفتحة الهوائية.

الحث والطاقة المغناطيسية:

في الفقرة 1.3، أدخلنا الحث L كعنصر من الدائرة الكهربائية. بالمقابل، يمكن أن ينتمي الحث إلى كميات الدائرة (أو المجال) المغناطيسية. لذا نعيد تعريف محادثة ملف ذي n لفة على أنه رابط التدفق، Δ، بواحدة التيار:

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} \qquad (5.13)$$

في العلاقة (5.13)، ϕ هو التدفق المار في كل لفة (أو المعدل الوسطي للتدفق في كل لفة). واحدة الحث هي الهنري (H) في الدائرة المغناطيسية التي تحوى n ملفاً مستقلاً، نعرف n2 محاثة بالعلاقة L_{Pq} التالية:

$$L_{pq} = \frac{\text{التدفق الذين يقرن الملف رقم p نتيجة التيار المار بالملف رقم/q}}{\text{التيار المار ملف بالملف q}}$$

$$= \frac{N_p\left(k_{pq}\phi_q\right)}{i_q} \qquad \left(p, q = 1, 2, \ldots, n\right) \qquad (6.13)$$

حيث N_p هو عدد لفات الملف رقم K وحيث k_{pq} معامل الاقتران بين الملف رقم P والملف رقم q ويعرف بأنه الجزء من التدفق الناتج عن الملف رقم q الذي يقرن الملف P. عندما $p \neq q$ تسمى L_{pq} الحث المتبادل بين الملفين p وq عندما $p = q$ يكون L_{pp} هو الحث الذاتي للملف p. إذا كانت التيارات المارة في n ملفا هي $i_1, i_2, \ldots, i_m$ يمكن البرهان على أن الطاقة المختزنة في مجموع المحاثات هي:

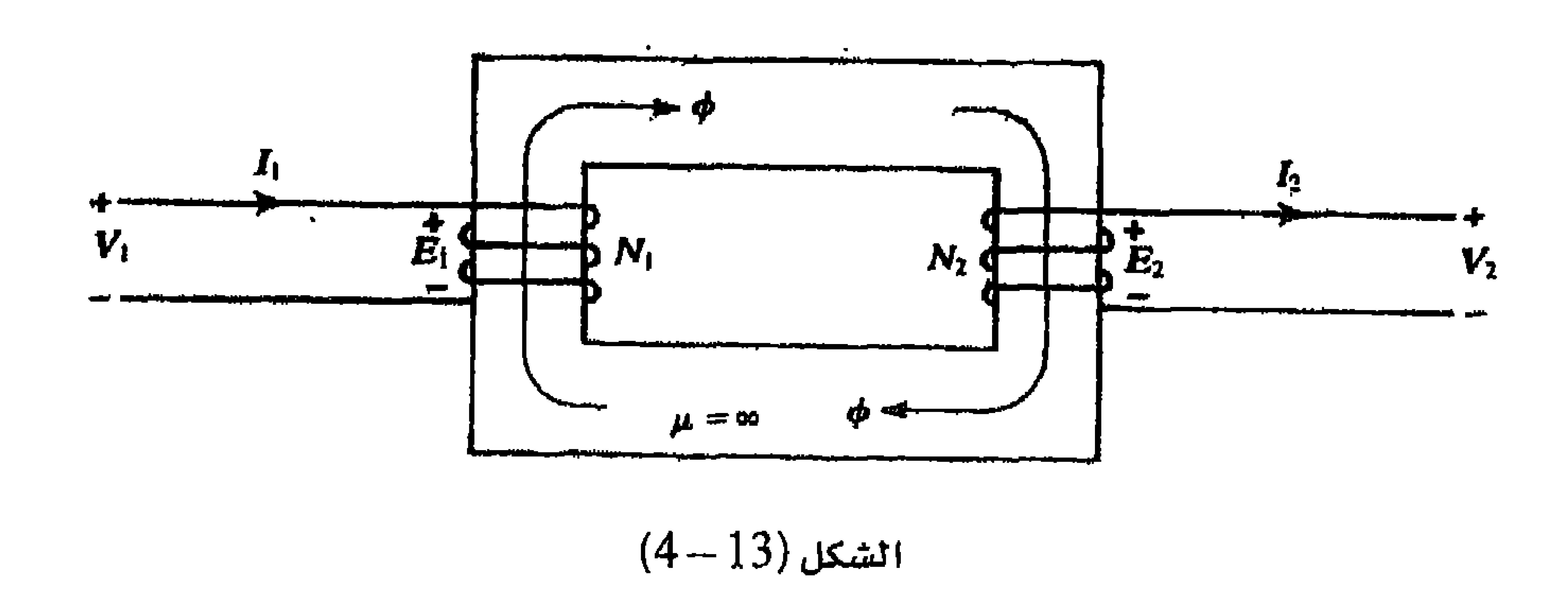
$$Wm = \frac{1}{2}\sum_{p=1}^{n}\sum_{q=1}^{n} L_{pq} i_p i_q \qquad (7.13)$$

إضافة لما سبق، يمكن إثبات أنه يمكن التعبير عن نفس الطاقة بدلالة كميات المجال المغناطيسي B وH بالشكل:

$$Wm = \frac{1}{2}\int B.H dv = \frac{1}{2} u \int H^2 dv = \frac{1}{2\mu}\int B^2 dv \qquad (8.13)$$

عمل المحول:

المحول هو جهاز كهرطيسي (كهربائي – مغناطيسي)، له لفافتان أو أكثر مقترنتان بشكل متبادل (تشترك جميعاً بدائرة مغناطيسية مشتركة. يبين الشكل 4.13 محولاً مثالياً بلفافتين. المحول المثالي هو الذي تكون نواته بدون ضياعات وإنفاذيته لا نهائية، ولا يوجد في تسرب في التدفق، ولا تسرب في لفائفه.



الشكل (4 – 13)

في الشكل 4.13 تظهر المكونات الأساسية وهي النواة، اللفافة الابتدائية، N_1، واللفافة الثانوية N_2 إذا كان ϕ هو التدفق المتبادل (أو تدفق النواة) الذي يعبر كل لفة من لفات N_1 وN_2، عندئذ، وحسب قانون فاراداي للحث الكهرطيسي،تستحث قوتان محركتان كهربائيان e_1 وe_2 في N_1 وN_2 حسب العلاقة التالية:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \qquad e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \qquad (9.13)$$

يكون اتجاه e بحيث ينتج عنها تيار يزيد من التدفق الذي يعاكس تغير التدفق (حسب قانون لينز) من (9.13) $e_1/e_2 = N_1/N_2$، أو حسب قيم rms:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \equiv a \qquad (10.13)$$

حيث a هي نسبة عدد اللفات.

في المحول المثالي، $e_1 = v_1$ و $e_2 = v_2$ في الشكل 4.13 فالعلاقة بين الجهد والتدفق:

$$\phi = \frac{1}{N_1} \int v_1 \ dt = \frac{1}{N_2} \int v_2 .dt \qquad (11.13)$$

إذا كان تغير التدفق يتم بشكل جيبي $\phi = \phi_m \sin wt$ فالجهد المستحث الموافق هو:

$$e = wN\phi_m \cos wt \qquad (12.13)$$

والقيمة rms لهذا الجهد المستحث هي:

$$E = \frac{wN\phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 fN\phi_m \qquad (13.13)$$

والـتي تـدعى علاقـة القـوة المحركـة الكهربائيـة الكميـة $f = w/2\pi$ في العلاقة (13.13) هي تردد التدفق، واحدتها الهرتز (Hz).

تحويلات التيار والجهد والمعاوقة:

تسـتخدم المحـولات لتنفيـذ تحـويلات في الجهـد والتيـار والمعاوقـة، ولتـأمين العازلية (أي لمنع حدوث تماس مباشر بين الدوائر الكهربائية) خاصية تحويل الجهد لمحول مثالي حصلنا عليها من الفقرة 3.13:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = a \qquad (14.13)$$

حيث رمزنا بالدليل 1 للطرف الأولي من المحول، و2 للطرف الثانوي.

في المحـول المثـالي، محصـلة القـوى المحركـة المغناطيسـية حـول دائـرة مغناطيسية، يجب أن تساوي الصفر إذن: $N_1I_1 - N_2I_2=0$، أو:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = a \qquad (15.13)$$

مـن (14.13) و(14.13) يمكـن إثبـات أنـه، إذا تم توصـيل معـاوقـة Z_2 إلى الثانوي، فإن المعاوقة Z_1 التي تشاهد من جانب الأولي تحقق العلاقة:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = a^2 \qquad (16.13)$$

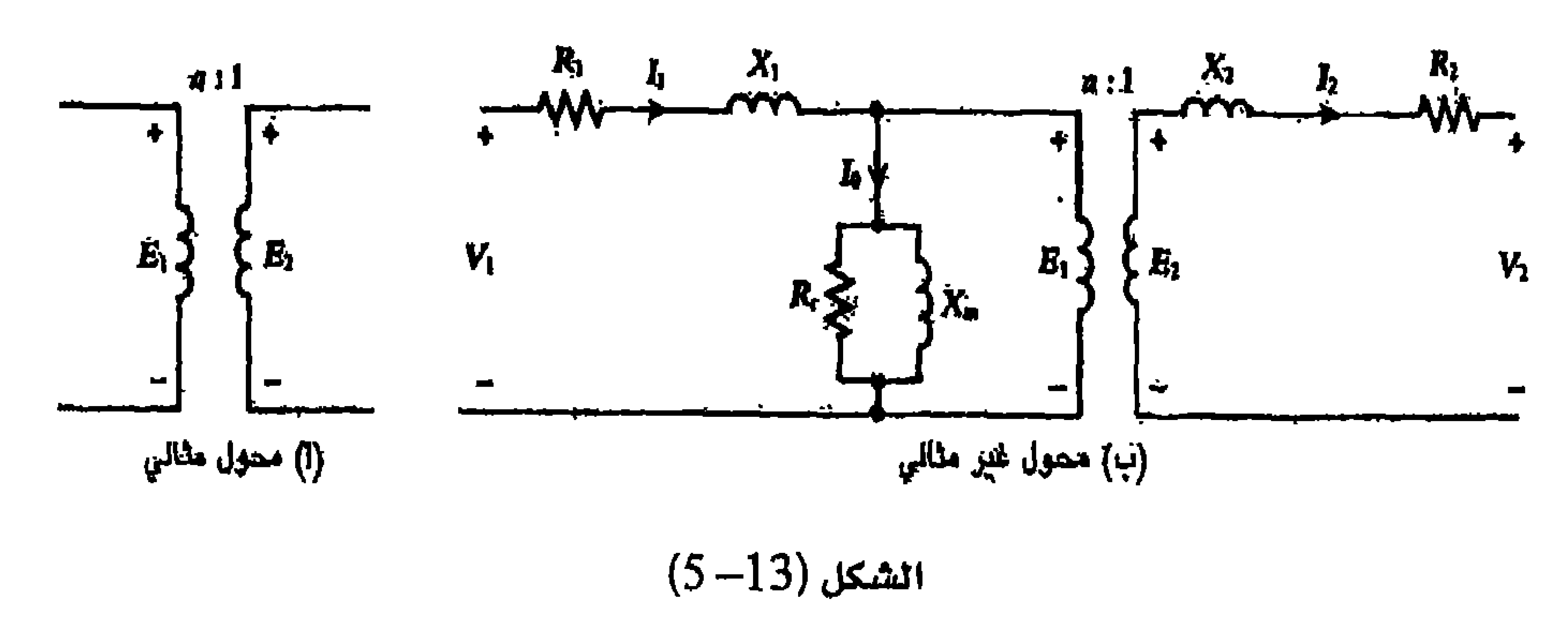
المحولات غير المثالية:

يختلـف المحـول غـير المثـالي (أي الـواقعي) عـن المحـول المثـالي بـأن لـلأول ضياعات دوامية وتختلف (تباطؤية) في النواة، وضياعات أومية (I_2R) في اللفافتين الأولية والثانوية. إضافة لذلك، ليست النواة في الملف غير المثالي ذات إنفاذية تامة،

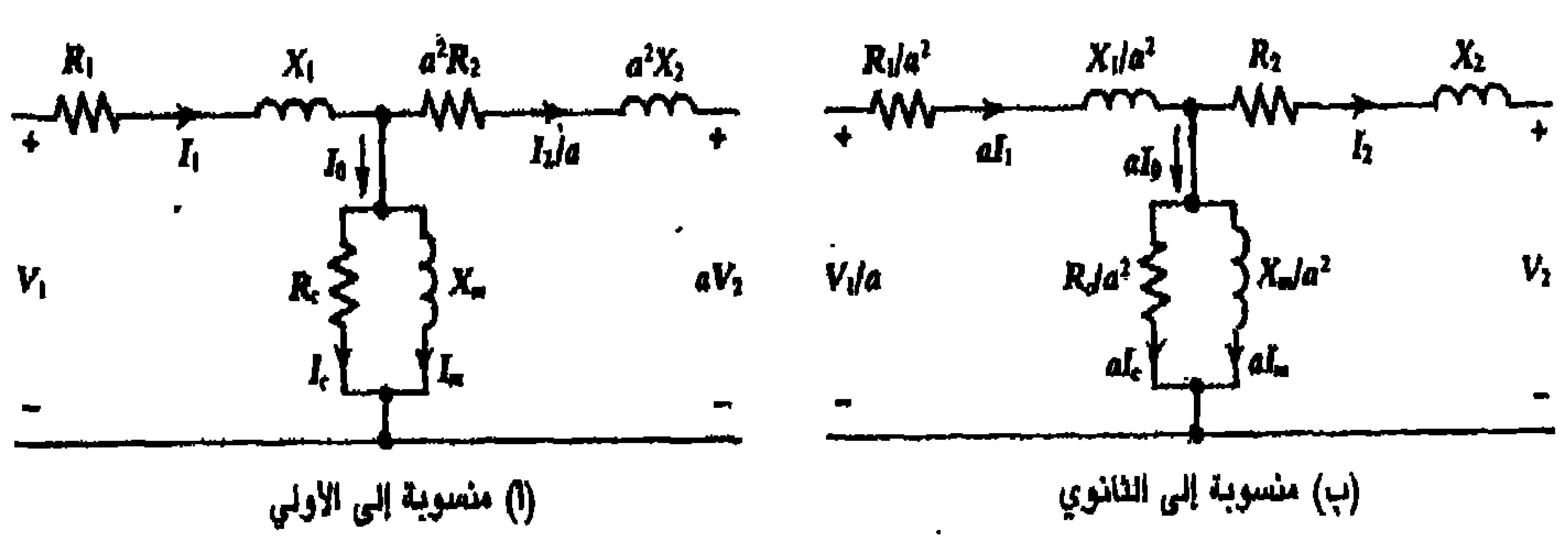
وتتطلب قوة محركة مغناطيسية من أجل المغنطة. أخيراً، وبسبب التسرب، ليس كل التدفق يقرن بين اللفافتين الأولية والثانوية بنفس الوقت في المحول غير المثالي.

الدوائر المكافئة:

يبين الشكل 5.13 (أ) دائرة مكافئة لمحول مثالي. عند الأخذ بعين الاعتبار الآثار غير المثالية لكل من مقاومات اللفائف، مفاعلة التسرب، مفاعلة المغنطة وضياعات النواة، نحصل على الدوائرة في الشكل 5.13 (ب)، والتي فيها يرتبط الأولي مع الثانوي بمحول مثالي. باستخدام (14.13) و(15.13) و(16.13)، يمكن إزالة المحول المثالي من الشكل 5.13 (ب) وتشير الدائرة المكافئة بكاملها إما إلى الأولي، كما بالشكل 6.13 (أ) أو الثانوي، كما بالشكل 6.13 (ب).



الشكل (13– 5)



الشكل (13– 6) الدوائر المكافئة للمحلول غير المثالي

يبين الشكل 7.13 مخططا طورياً لدائرة الشكل 6.13 (أ) في حالة معامل قدرة متأخر. الرموز الواردة في الأشكال (5.13) و(6.13) و(7.13) هي:

$a \equiv$ نسبة اللفات.

$E_1 \equiv$ الجهد المستحث الأولي

$E_2 \equiv$ الجهد المستحث الثانوي.

$V_1 \equiv$ جهد الطرف الأولي

$V_2 \equiv$ جهد الطرف الثانوي.

$I_1 \equiv$ تيار الأولي

$I_2 \equiv$ تيار الثانوي.

$I_0 \equiv$ تيار اللاحمولة (الأولى)

$R_1 \equiv$ مقاومة اللفافة الأولية

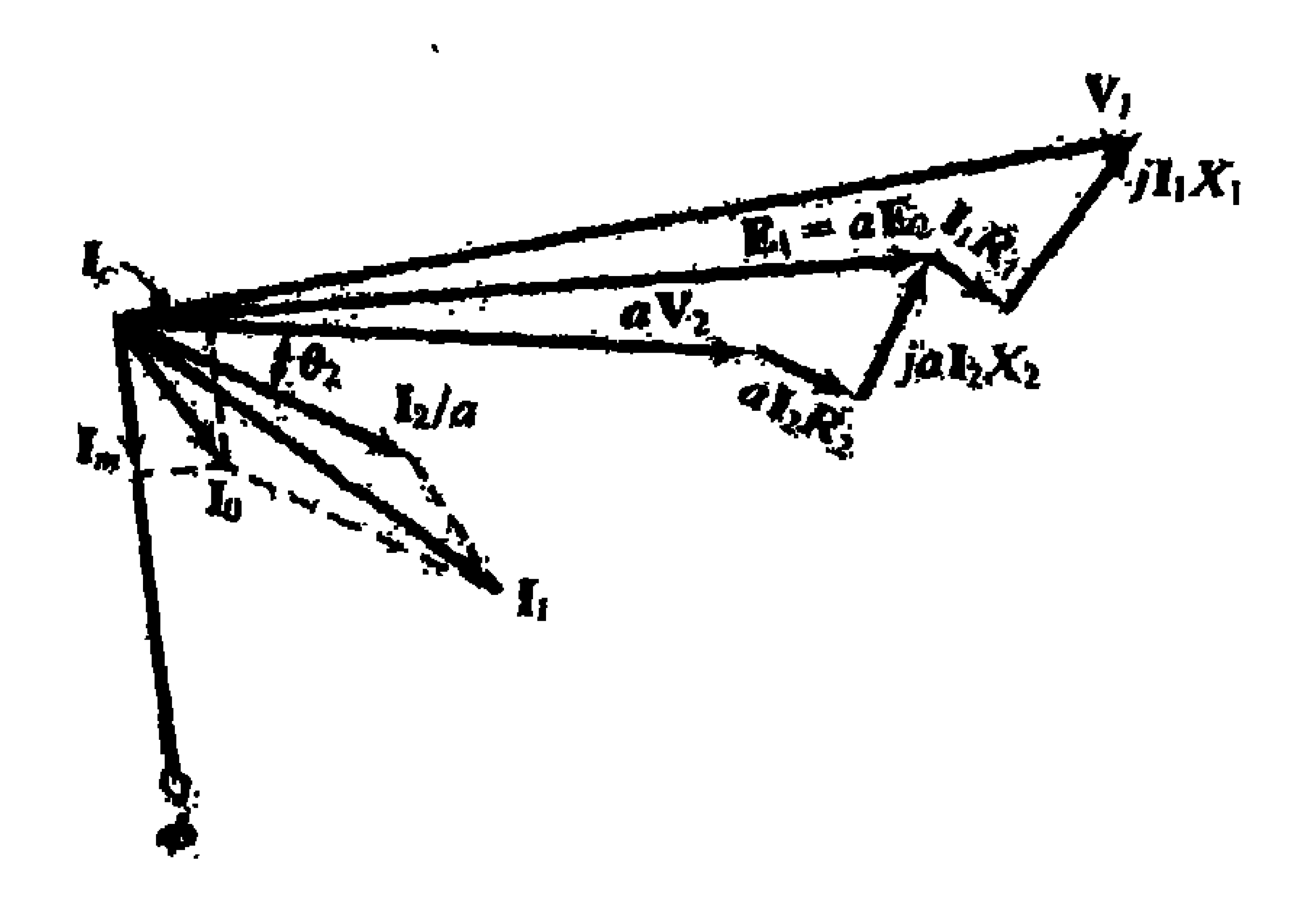
$R_2 \equiv$ مقاومة اللفاف الثانوية

$X_1 \equiv$ مفاعلة التسرب الأولية

$X_2 \equiv$ مفاعلة التسرب الثانوية

$I_m, X_m \equiv$ تيار ومفاعلة التمغنط

$I_c, R_c \equiv$ التيار والمقاومة مع مراعاة ضياعات النواة



الشكل (13– 7)

تجارب على المحولات:

يمكن الحصول على مميزات أداء المحول من الدوائر المكافئة في الفقرة 6.13 تتحدد بارامترات الدائرة سواء من معطيات التصميم أو من معطيات التجربة. التجربتان الشهيرتان هما:

تجربة الدائرة المفتوحة (بدون حمل):

يتم هنا فتح الدائرة لإحدى اللفافتين، ويطبق جهد – يكون عادة الجهد المقدر عند التردد المقدر– على اللفافة الأخرى. يتم قياس الجهد والتيار والقدرة عند طرفي اللفافة. كما يقاس جهد الدائرة المفتوحة للفاة الثانية. ومن هذا القياس يمكن معرفة نسبة عدد اللفات. من المناسب عادة تطبيق جهد التجربة على اللفافة التي لها معدل الجهد مساو لجهد مصدر القدرة المتوفر. في حالة محولات رفع الجهد، هذا يعني أن جهد الدائرة المفتوحة للفافة الثانية سيكون أكبر من الجهد المطبق، وأحيانا أكبر بكثير يجب الحذر والاهتمام بطرفي هذه اللفافة للحفاظ على أمن وسلامة عناصر التجربة، ويجب عدم تقريب أي من الطرفين من بقية الدوائر الكهربائية أو أدوات القياس أو الأرض ... وغيرها.

عند تقديم بارامترات للاحمل على أنها ممكنة الاستخراج من معطيات التجربة، كان الافتراض هو أن يطبق الجهد الأولي، وتفتح دائرة الثانوي. ضياع

القدرة في حالة اللاحمل، يساوي قراءة مقياس القدرة في هذه التجربة. يمكن ايجاد الضيع بسبب النواة، بطرح الضياع الأومي في الأولي،والذي يكون صغيراً ويمكن إهماله في بعض الحالات. وهكذا، إذا كانت القدرة والتيار والجهد عند الدخل هي P_0، I_0، V_0 عندئذ يعطي ضياع النواة بالشكل:

$$P_c = P_0 - I_0^2 R_1 \qquad (17.13)$$

الجهد المستحث بالأولي، يعطي بالشكل الطوري:

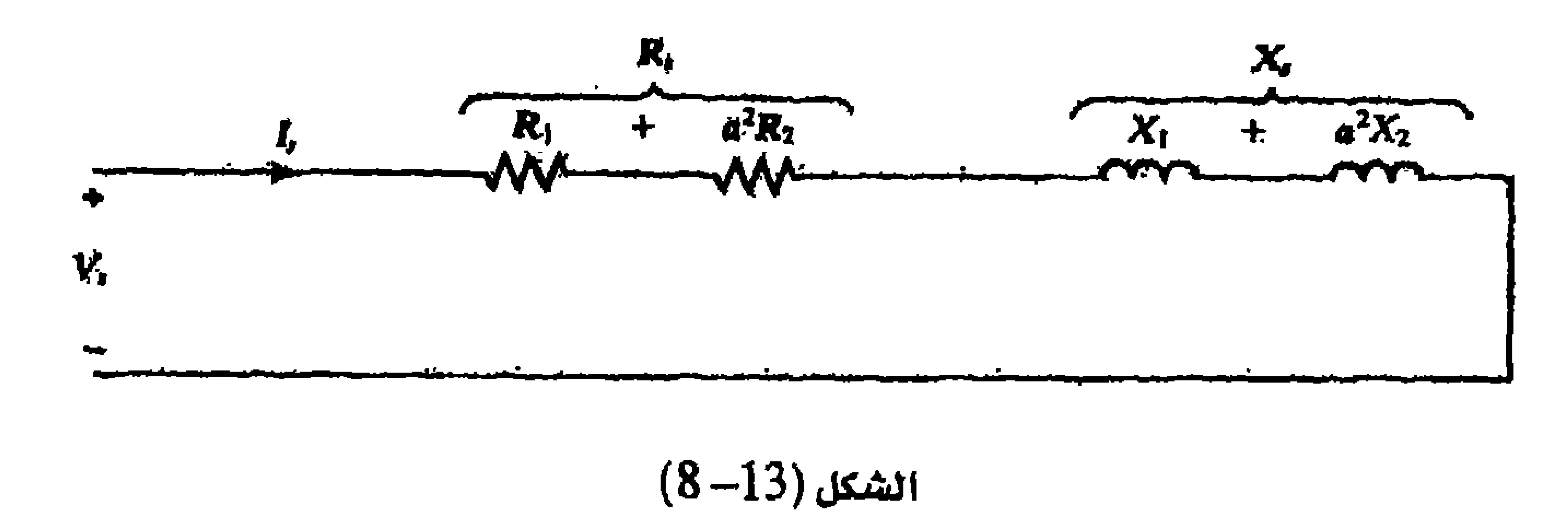
$$E1 = V0/\underline{0^o} - (Io/\underline{\theta_0})(R_1 + jX_1) \qquad (18.13)$$

حيث $\theta_0 \equiv \theta_0$ زاوية معامل القدرة بدون حمل وتساوي $\cos^{-1}(P_0/V_0 I_0) < 0$ نوجد الكميات الأخرى للدائرة من العلاقات:

$$a \approx \frac{V_0}{E_2} \quad X_m = \frac{E_1}{I_m} \quad I_m = \sqrt{I_0^2 - I_C^2} \quad I_c = \frac{P_c}{E_1} \quad R_c = \frac{E_1^2}{P_c} \qquad (19.13)$$

تجربة الدائرة المقصورة:

في هذه التجربة، يتم قصر إحدى الفافتين بين طرفيها، ويطبق جهد مخفض على اللفافة الأخرى.يكون مقدار الجهد منخفضاً بحيث يكفي لخلق قيمة محددة من التيار يكون مقدارها معدل التيار عادة — يمر في لفافة الدائرة المقصورة. هنا أيضاً، يتم اختيار اللفافة التي يتم قصر دائرتها باستخدام أجهزة القياس المتوفرة. يجب الاهتمام بتحديد اللفافة المقصورة ووضع علامة عليها، لأنها يمكن أن تستخدم كمرجع للتعبير عن مكونات المعاوقة التي تنتج عن الجربة. هنا سوف نختار أن نقصر دائرة الثانوي، وأن نطبق الجهد المنخفض على الأولي.



الشكل (13– 8)

عند تطبيق جهد صغير جداً على لفافة الأولى، يصبح كل من تيار الضياع في النواة وتيار المغنطة صغيراً جداً، وتؤول الدائرة المكافئة إلى الشكل 8.13 وهكذا إذا كان P_S، I_S، وV_S القدرة والتيار والجهد للدخل عن قصر الدائرة، عندئذ يكون في الأولي.

$$Z_s = \frac{V_s}{I_s} \tag{20.13}$$

$$R_1 + a^2 R_2 \equiv R_s = \frac{P_s}{I_s^2} \tag{21.31}$$

$$X1 + a2X2 \equiv Xs = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} \tag{22.13}$$

بمعرفة قيم R_1 وa، R_2 يمكن استنتاج r_2 من (21.13) في (22.13) يتم عادة افتراض أن مفاعلة التسرب تنقسم بالتساوي بين الأولي والثانوي، أي:

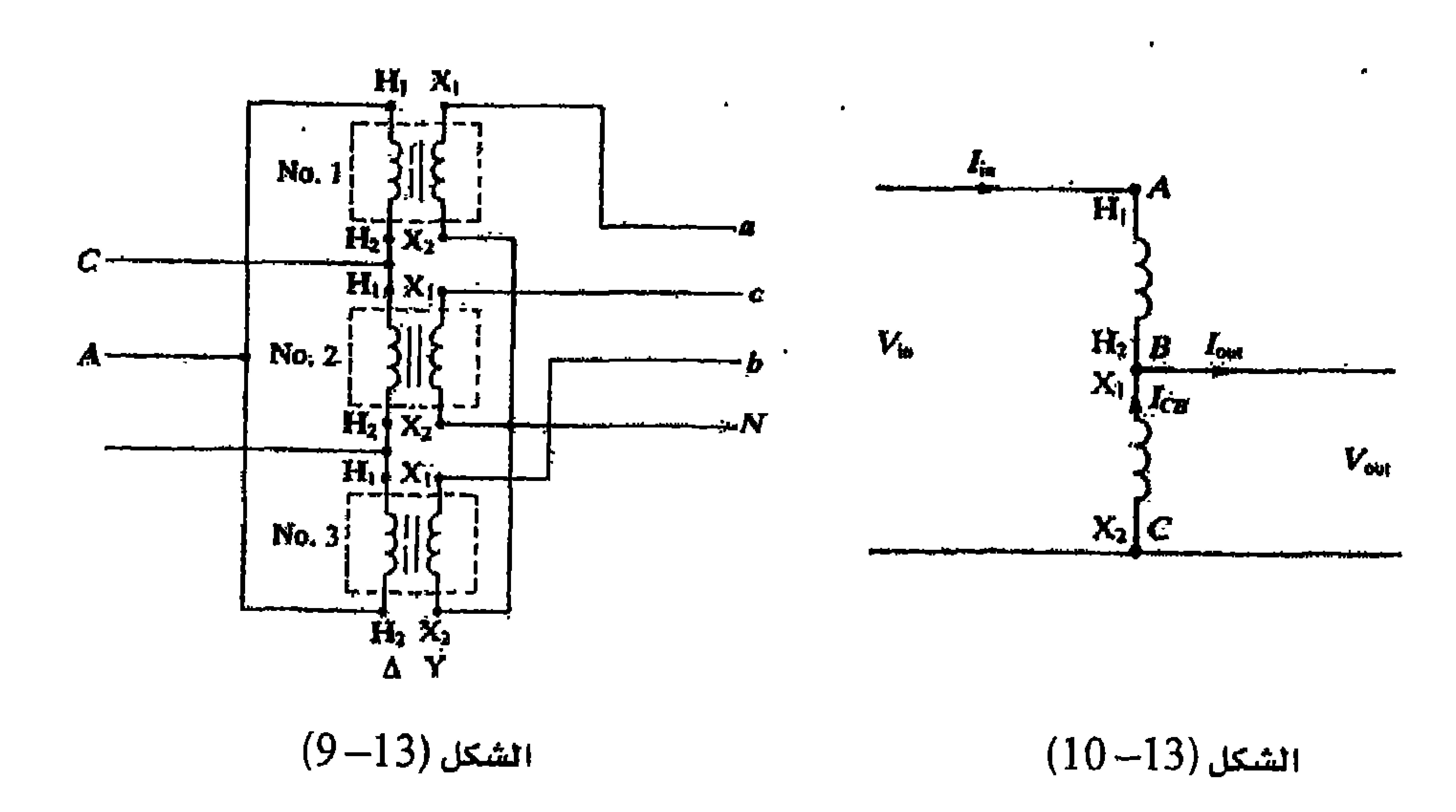
$$X_1 = a^2 X_2 = \frac{1}{2} X_s \tag{23.13}$$

توصيلات المحول:

يبين الجدول 2.13 تسعة نماذج مختلفة لتوصيل المحولات السبعة الأولى منها تستخدم لغايات تحويل الجهد، والنموذجان الآخران لتغيير عدد الأطور (لم نذكر بينها تحويلات الجهود وحيدة الطور) كل قطعة من مستقيم في رموز الجدول، تدل على لفافة واحدة من محول.

ينبغـي ملاحظـة علامـات الأطـراف في المحـول متعـدد الأطـراف. ولغايـات الإيضاح يبين الشكل 9.13 بعض التفاصيل حول اتصال ثلاثة محولات متماثلة بشكل دلتا ـ واي.

طريقة الربط	الأولي	الثانوي
ثنائي الطور	L	L أو L
ثلاثي الطور، دلتا ـ دلتا	Δ	Δ
ثلاثي الطور، دلتا ـ واي	Δ	Y
ثلاثي الطور، واي ـ دلتا	Y	Δ
ثلاثي الطور، واي ـ واي	Y	Y
ثلاثي الطور، دلتا مفتوح	∠	∠
ثلاثي الطور، حرف تي	T 0.5 0.5 0.866	T 0.5 0.5 0.866
ثنائي الطور ـ ثلاثي الطور (سكوت)	L	⊥ 0.866 0.5 0.5
ثلاثي الطور ـ سداسي الطور (قطري)	Y أو ▷	✳



الشكل (13–9)

الشكل (13–10)

المحولات الذاتية:

المحول الذاتي هو محول بلفافة وحيدة، وهو أداة كثيرة الفائدة من أجل بعض التطبيقات بسبب بساطته وانخفاض كلفته مقارنة بالمحولات متعددة اللفائف. ولكن هذا النوع لا يقدم عازلية كهربائية فلا يستخدم عندما يطلب تحقيق غاية العازلة. يمكن الوصول إلى دائرة المحول الذاتي الشكل 10.13 انطلاقاً من محول بلفافتين، بوصل اللفافتين – كهربائياً – على التسلسل، فتصبح القطبيتان بحالة الجمع. أفرض أن ذلك قد تم في الشكل 10.13، حيث فيه اللفافة الأولية من المحول ثنائي اللفافة، هي AB والثانوية هي BC. الأولية في المحول الذاتي – الآن – هي مجموعة اللفافتين، AC والثانوية هي BC فنسبة عدد اللفات والجهد في المحول الذاتي هي:

$$a' = \frac{E_{AB} + E_{BC}}{E_{BC}} = \frac{NAB + N_{BC}}{N_{BC}} = a + 1 \qquad (24.13)$$

حيث a هي نسبة الجهد وعدد اللفات للمحول الأصلي ثنائي اللفافة. إن وصل زوج من اللفائف معاً للحصول على محول ذاتي، بالإضافة إلى تزويد نسبة تحويل أعلى من المحول ثنائي اللفافة، فهو أيضاً يقدم عدداً أكبر من الفولط – أمبير (القدرة الظاهرية).

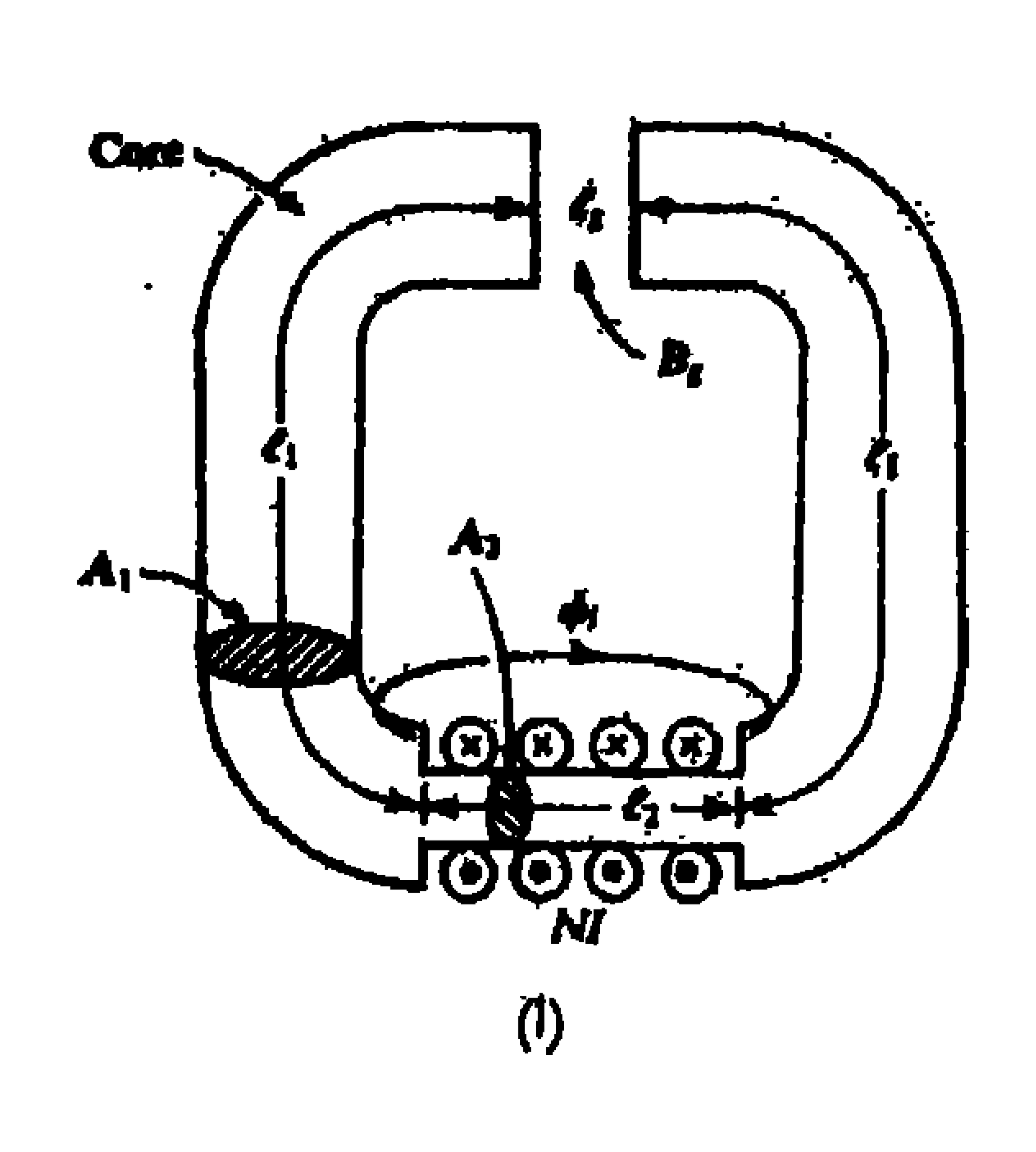
يكمن السبب في أن نقل القدرة الظاهرة من الأولي إلى الثانوي في المحول الذاتي لا يتحقق بواسطة الحث وحسب، كما في المحول ثنائي اللفافة، ولكن بواسطة النقل الكهربائي أيضاً.

مسائل محلولة:

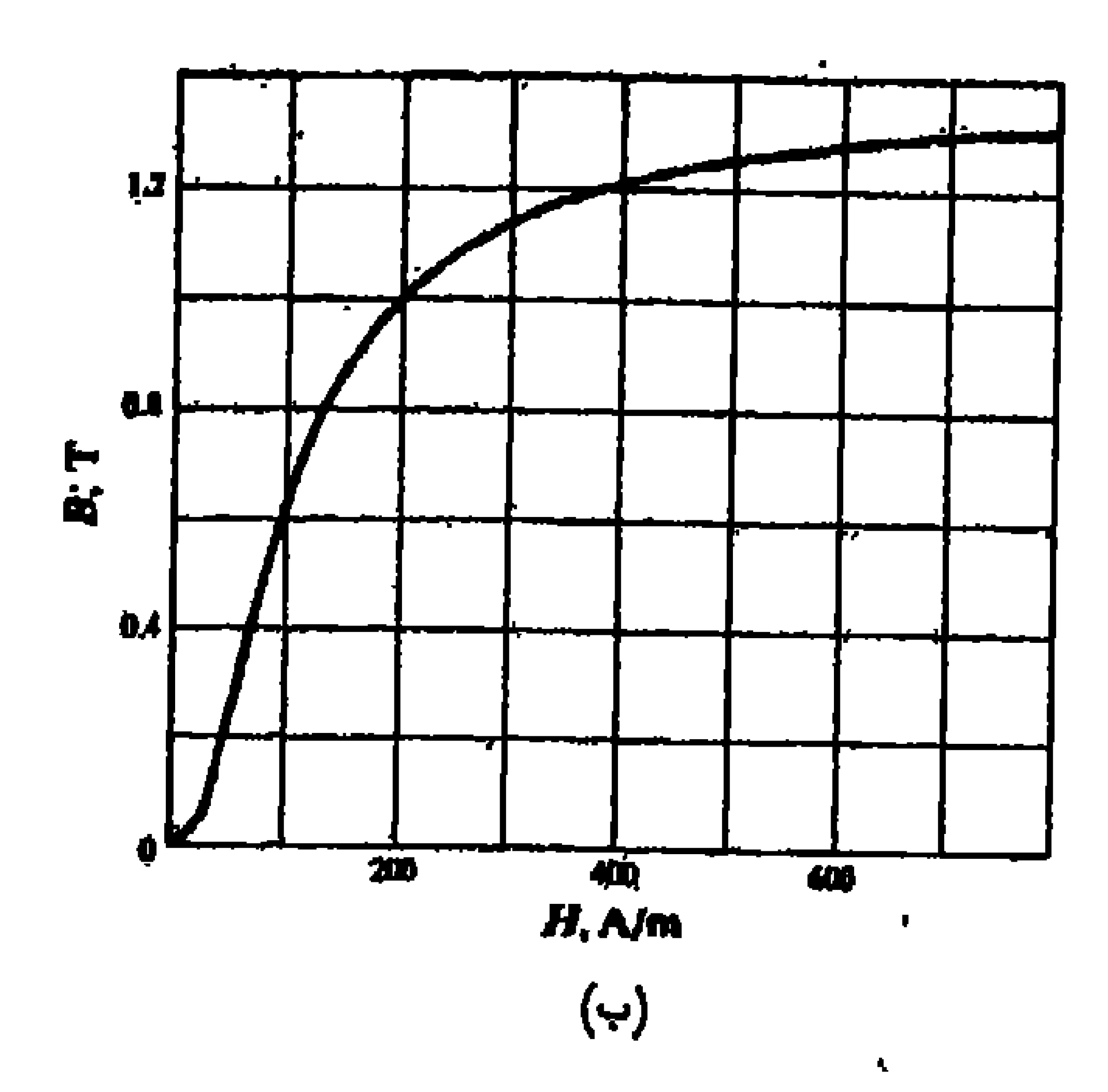
دائرة مغناطيسية مركبة لها مقطع عرضي متغير – الشكل 11.13 (أ) لقطعة الحديد فيها، مميزة BH.H كما بالشكل 11.13 (ب) يعطي عدد اللفات $\ell_g = 2mm,\ A_1 = 2A_2 = 10cm^2,\quad \ell_1 = 4\ell_2 = 40cm; N = 100$، تدفق التسرب

احسب التيار I المطلوب لتأمين كثافة تدفق في الفتحة الهوائية $\phi_1 = 0.01mWb$ قدره 0.6T.

وفقاً للعلاقة B_g=0.6T:



(أ)



(ب)

الشكل (13- 11)

$$B_{l1} = B_g = 0.6T \qquad F_g = (4.78x10^5)(2x10^{-3}) = 956At \qquad H_g = \frac{0.6}{\mu_0} = 4.78x10^5 A/m$$

من الشكل 11.13 (ب) عند H = 100A/m, B = 0.6T إذن من أجل الطولين ℓ_1

$$F_{l1} = (100)(0.40 + 0.40) = 80At$$

التدفق في الفتحة الهوائية هو $\phi_g = B_g A_1 = (0.6)(10x10^{-4}) = 0.6mWb$

التدفق الكلي الناتج من الملف، ϕ، هو مجموع تدفق الفتحة الهوائيةوتدفق التسرب:

$$\phi_c = \phi_g + \phi_1 = 0.6 + 0.01 = 0.61mWb$$

فكثافة التدفق في القسم ℓ_2 هو:

$$B2 = \frac{\phi_c}{A_2} = \frac{0.16x10^{-3}}{5x10^{-4}} = 1.22T$$

من أجل هذه الكثافة، من الشكل (ب) ينتج H=410/Am و

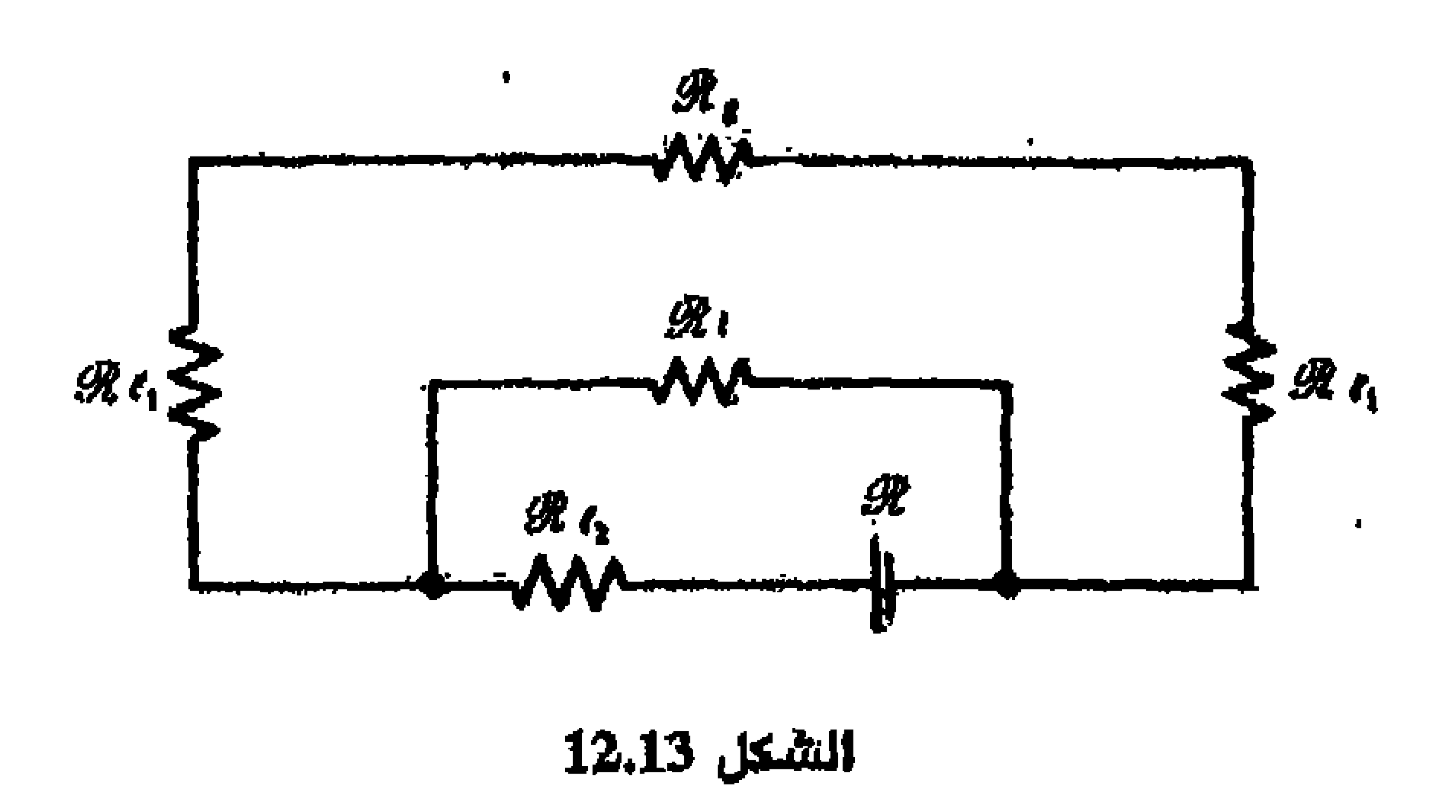
$$F_{\ell 2} = (410)(0.10) = 41At$$

فالمجموع المطلوب من القوة المحركة المغناطيسية هو $F_g + F_{\ell 1} + F_{\ell 2} = 956 + 80 + 41 = 1077At$، ومن أجل 100 لفة (قيمة N) التيار المطلوب:

$$I = \frac{1077}{100} = 10.77A$$

ارسم نظيراً كهربائياً للدائرة المغناطيسية في الشكل 11.13 (أ)

انظر إلى الشكل 12.13



الشكل 12.13

احسب الحث الذاتي الكلي وحث التسرب لملف الشكل 11.13 (أ).

من المسألة 1.13، التدفق الكلي الناتج في الملف هو $\phi_c = 0.6mVb$ والتيار I=10.77A إذن

$$L_l = \frac{N\phi_l}{I} = \frac{(100)(0.01\times10^{-3})}{10.77} = 0.093 \text{ mH} \qquad L = \frac{N\phi_c}{I} = \frac{(100)(0.61\times10^{-4})}{10.77} = 5.66 \text{ mH}$$

أوجد قيمة الطاقة المغناطيسية المختزنة في الحديد وفي الفتحة الهوائية للدائرة المغناطيسية المعطاة بالشكل 11.13 (أ) اهمل الكمية الصغيرة من الطاقة المختزنة في القسم الهوائي والناتجة عن التدفق المتسرب.

من (8.13)

$$W_{air} = \frac{1}{2\mu_0}B_g^2 \times \text{vol}_{gap} = \frac{(0.6)^2}{2\mu_0}(10\times10^{-4})(2\times10^{-3}) = 0.286 \text{ J}$$

من (7.13) ومن المسألة 4.13

$$W_{iron} = \frac{1}{2}LI^2 - W_{air} = \frac{1}{2}N\phi_c I - W_{air} = 0.328 - 0.286 = 0.042 \text{ J}$$

لاحظ أن $W_{air} >> W_{iron}$

يطلب الحصول على قيمة عظمى من التدفق في النواة قدرها 4.13 mWb في محول يعمل على جهد 110 V وتردد 60 Hz. أوجد العدد المطلوب من لفات الأولي.

من العلاقة (13.13)

$$N_1 = \frac{E_1}{4.44\phi_m f} = \frac{110}{(4.44)(4.13\times10^{-3})(60)} = 100 \text{ turns}$$

محول يأخذ قدرة 75W عند تيار 1.5A وجهد 120 V. إذا كانت مقاومة لفافة الأولى 0.4Ω أوجد (أ) ضياعات النواة، (ب) معامل القدرة بدون حمل.

الأجوبة:

(أ) $$P_c = 75 - (1.5)^2(0.4) = 74.1 \text{ W}$$

(ب) $$\cos\theta_0 = \frac{75}{(120)(1.5)} = 0.417 \text{ (متأخر)}$$

ضع بدلاً من نواة المحول في المسألة 6.13 ما يماثلها من تركيب متوازٍ مكون من R_c و X_m واحصل على القيم الرقمية لها. أهمل كل أثر ناتج عن لفافة الأولي.

$$R_c = \frac{(120)^2}{75} = 192\ \Omega \qquad I_m = \sqrt{(1.5)^2 - (0.625)^2} = 1.36\ \text{A}$$

$$I_c = \frac{120}{192} = 0.625\ \text{A} \qquad X_m = \frac{120}{1.36} = 88\ \Omega$$

وبارامترات الدائرة المكافئة للمحول $2400 - \text{V}/240 - \text{V},\ 150 - \text{kVA}$ المبين على الشكل 6.13 هي $R_1=0.2\Omega$، $R_2=2\text{m}\Omega$، $X_1=0.45\Omega$، $X_2=4.5\text{m}\Omega$، $R_c=10\text{K}\Omega$، $Xm=1.55\text{k}\Omega$ باستخدام الدائرة المشار إليها على أنها الأولي، أوجد (أ) تنظيم الجهد، (ب) مردود المحول عندما يعمل عند قيمة مقدرة للحمل بعامل قدرة 0.8 ومتاخر.

راجع الشكل 6.13 (أ) و7.13 معطى $V2=240V$، $a=10$

$$a\mathbf{V}_2 = 2400\underline{/0^\circ}\ \ \text{V}$$

$$I_2 = \frac{150 \times 10^3}{240} = 625\ \text{A} \qquad \frac{\mathbf{I}_2}{a} = 62.5\underline{/-36.8^\circ} = 50 - j37.5\ \text{A}$$

و $\theta_2 = \cos^{-1} 0.8 = 36.8^\circ$

$$\mathbf{E}_1 = (2400 + j0) + (50 - j37.5)(0.2 + j0.45) = 2427 + j15 = 2427\angle 0.35^\circ \quad V$$

$$\mathbf{I}_m = \frac{2427\angle 0.35^\circ}{1550\angle 90^\circ} = 1.56\angle -89.65^\circ = 0.0095 - j1.56 \quad A$$

$$\mathbf{I}_c = \frac{2427 + j15}{10 \times 10^3} \approx 0.2427 + j0 \quad A$$

وكذلك $a^2R_2 = 0.2\Omega$ و $a^2X_2 = 0.45\Omega$ بحيث:

إذن

$$\mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_c + \mathbf{I}_m = 0.25 - j1.56 \quad A$$

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_0 + (\mathbf{I}_2/a) = 50.25 - j39.06 = 63.65\angle -37.85^\circ \quad A$$

$$\mathbf{V}_1 = (2427 + j15) + (50.25 - j39.06)(0.2 + j0.45) = 2455 + j30 = 2455\angle 0.7^\circ \quad V$$

(أ) التنظيم النسبي المئوي

$$100\% \times \frac{V_{\text{no-load}} - V_{\text{load}}}{V_{\text{load}}} =$$

$$100\% \times \frac{V_1 - aV_2}{aV_2} =$$

$$100\% \times \frac{2455 - 2400}{2400} =$$

$$2.3\% =$$

(ب) $\text{المردود} \equiv \frac{\text{الخرج}}{\text{الدخل}} = \frac{\text{الخرج}}{\text{الخرج} + \text{الضياعات}}$

$$\text{الخرج} = (150 \times 10^3)(0.8) = 120\ \text{kW}$$

الآن $\text{الضياعات} = I_2^2 R_2 + I_c^2 R_c + I_1^2 R_1$

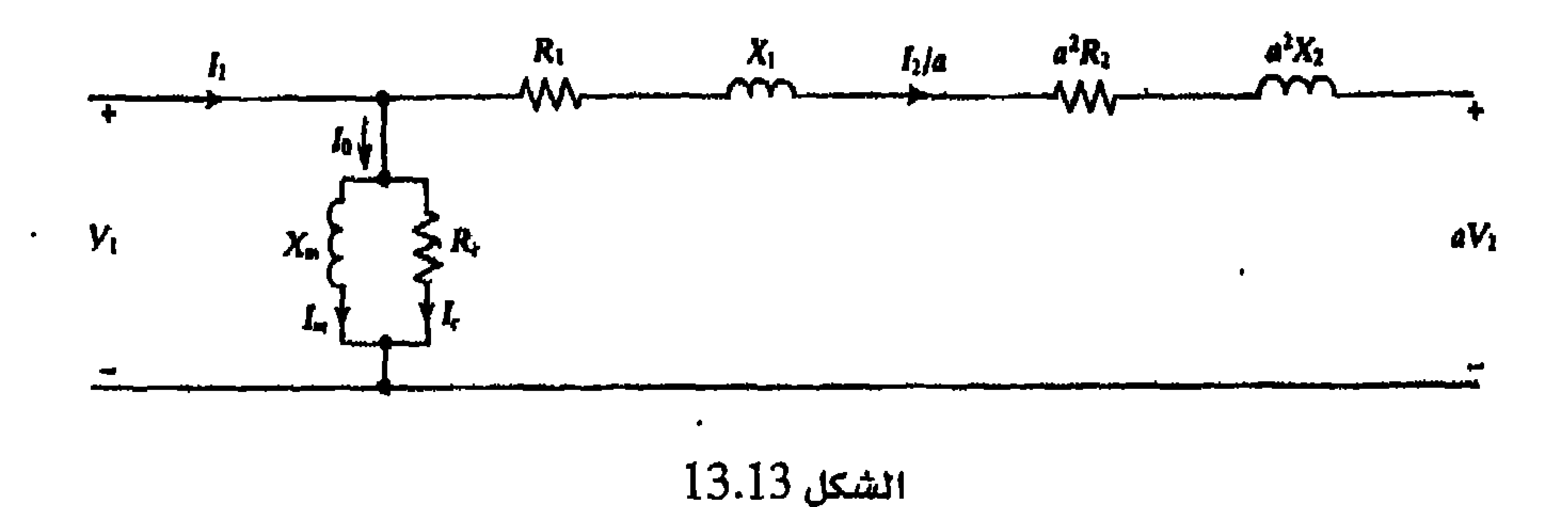
$$= (625)^2(2 \times 10^{-3}) + (0.2427)^2(10 \times 10^3) + (63.65)^2(0.2)$$

$$= 2.18\ \text{kW}$$

$$= \frac{120}{122.18} = 0.982$$

وبالتالي المردود $= 98.2\%$

دائرة تقريبية لمحول مبينة على الشكل 13.13 استخدم هذه الدائرة وأعد حل المسألة 8.13 ثم قارن النتائج. ارسم مخططا طورياً يبين جميع الجهود والتيارات.

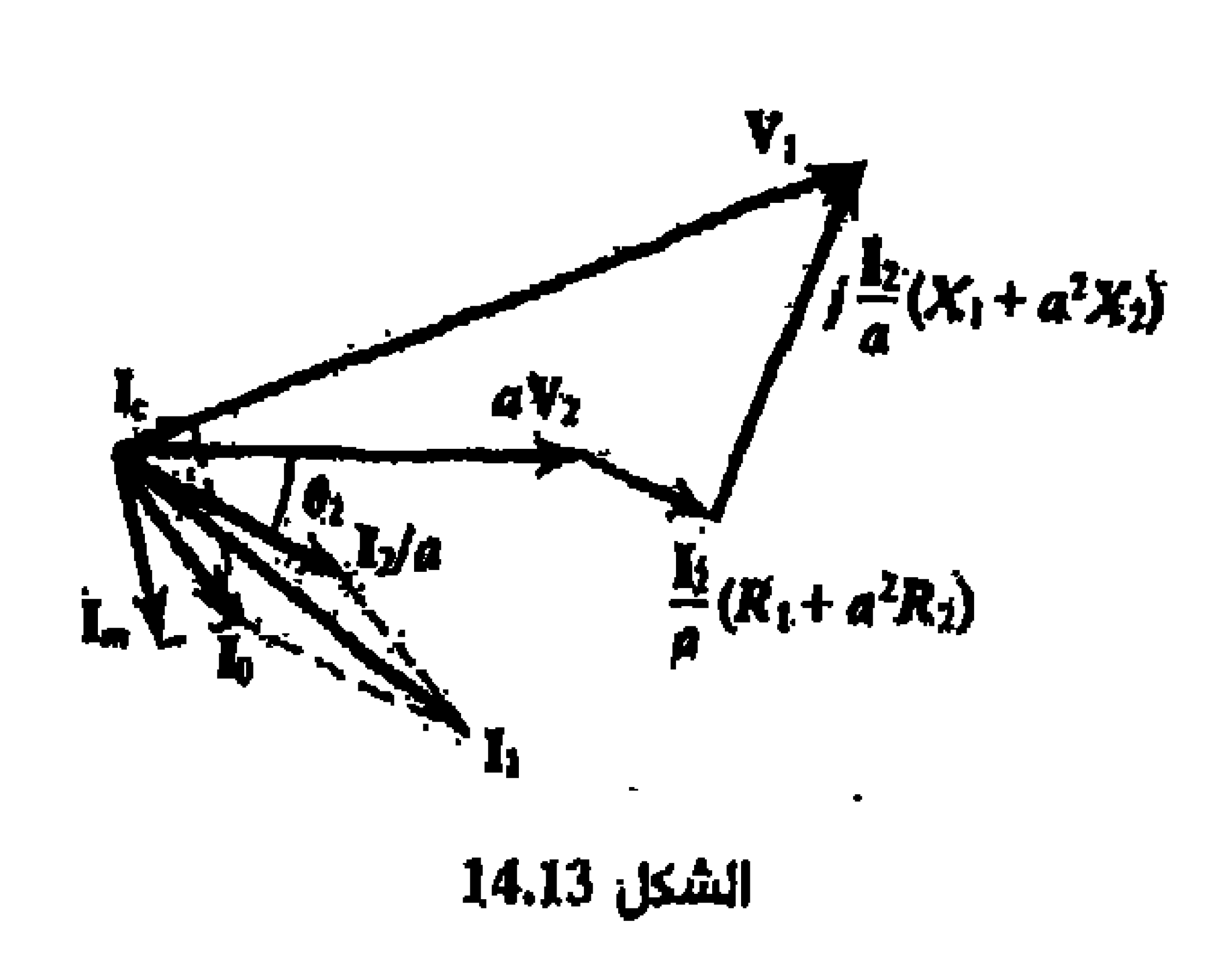


الشكل 13.13

من المسألة 8.13:

$X_1 + a^2X_2 = 0.9\,\Omega \qquad R_1 + a^2R_2 = 0.4\,\Omega \qquad \frac{\mathbf{I}_2}{a} = 50 - j37.5 \text{ A} \qquad a\mathbf{V}_2 = 2400\angle 0^\circ \text{ V}$

$$\mathbf{V}_1 = (2400 + j0) + (50 - j37.5)(0.4 + j0.9)$$
$$= 2453 + j30 = 2453\angle 0.7^\circ \text{ V}$$
$$\mathbf{I}_c = \frac{2453\angle 0.7^\circ}{10 \times 10^3} = 0.2453\angle 0.7^\circ \text{ A}$$
$$\mathbf{I}_m = \frac{2453\angle 0.7^\circ}{1550\angle 90^\circ} = 1.58\angle -89.3^\circ \text{ A}$$
$$\mathbf{I}_0 = 0.2453 - j1.58 \text{ A}$$
$$\mathbf{I}_1 = 50.25 - j39.08 = 63.66\angle -37.9^\circ \text{ A}$$



الشكل 14.13

المخطط الطوري معطى بالشكل 14.13:

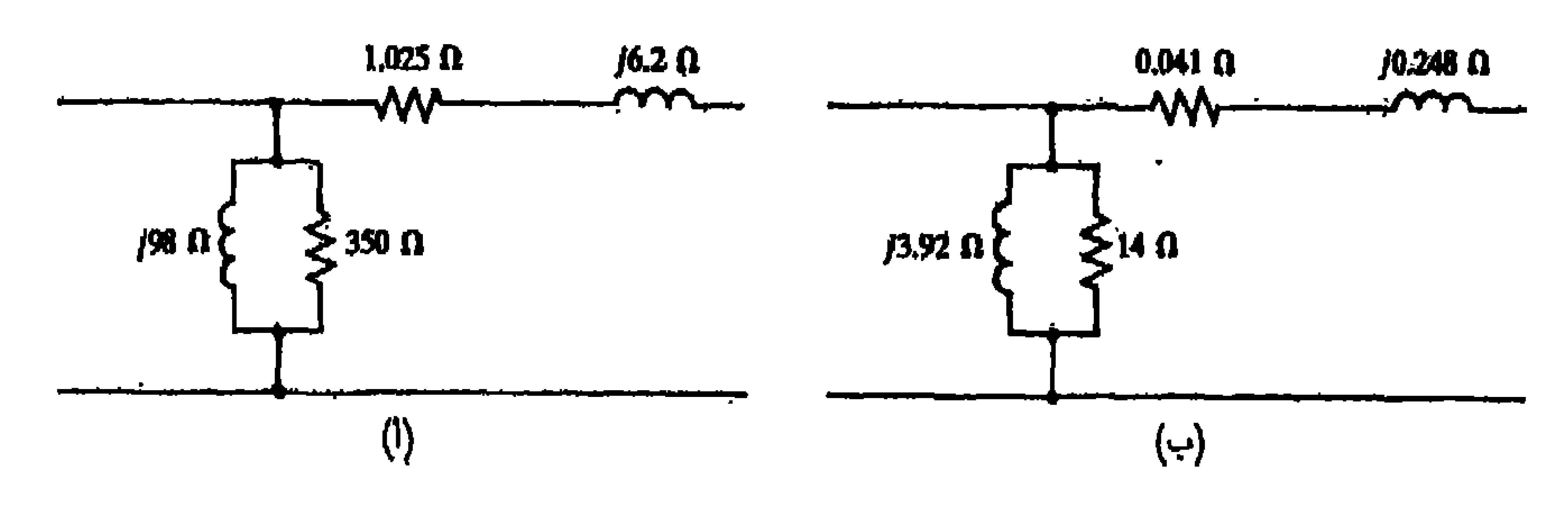
(أ) التنظيم النسبي المئوي $= 100\% x \frac{2453 - 2400}{2400} = 2.2\%$

(ب) المردود $= \frac{120 \times 103}{(120x10^3) + (63.66)^2(0.4) + (0.2453)^3(10x10^3)}$

$$= 0.982$$
$$= 98.2\%$$

لاحظ أن الدائرة التقريبية تعطي نتائج دقيقة إلى درجة كافية.

القيم الأومية لبارامترات الدائرة في محول له نسبة لفات 5، هي منسوبة للأولـي: $R_1=0.5\Omega$؛ $E_2=0.021\Omega$، $X_1=3.2\Omega$؛ $X_2=0.12\Omega$؛ $R_c=350\Omega$ وتساوي $X_m=98\Omega$ منسوبة للثانوي. أرسم الدوائر التقريبية المكافئة للمحول (أ) منسوبة للأولي (ب) منسوبة للثانوي. أوجد القيم العديدة لبارامترات الدائرة.



الشكل 13.15

الدائرتان موضحتان في الشكلين 15.13 (أ) و(15.13 (ب) على الترتيب.

والحسابات هي كما يلي:

(أ)

$$R' \equiv R_1 + a^2R_2 = 0.5 + (5)^2(0.021) = 1.025\ \Omega$$
$$X' \equiv X_1 + a^2X_2 = 3.2 + (5)^2(0.12) = 6.2\ \Omega$$
$$R'_c = 350\ \Omega$$
$$X'_m = 98\ \Omega$$

(ب)

$$R'' \equiv \frac{R_1}{a^2} + R_2 = \frac{0.5}{25} + 0.021 = 0.041\ \Omega$$
$$X'' \equiv \frac{X_1}{a^2} + X_2 = \frac{3.2}{25} + 0.12 = 0.248\ \Omega$$
$$R''_c = \frac{350}{25} = 14\ \Omega$$
$$X''_m = \frac{98}{25} = 3.92\ \Omega$$

نتائج تجربتي الدائرة المفتوحة والدائرة المقصورة على محول 25 – kVA، 440 – V/220 – V، 60 – Hz هي كالتالي:

تجربة الدائرة المفتوحة. تفتح دائرة الأولي، توضع أجهزة القياس على الطرف حيث الجهد منخفض. جهد الدخل. 220 V، تيار الدخل 9.6 A، قدرة الدخل 710 W. تجربة دائرة القصر. نقصر دائرة الثانوي. توضع أجهزة القياس على الطرف ذي الجهد العالي. جهد الدخل: 42 V؛ تيار الدخل 57 A؛ قدرة الدخل 1030 W.

احصل على بارامترات الدائرة المكافئة تماماً (الشكل 6.13) منسوبة على طرف الجهد العالي: افرض أن $R_1=a^2R_2$ و$X_1=a^2X_2$ من تجربة الدائرة المقصورة:

$$Z_{s1} = \frac{42}{57} = 0.737\ \Omega \qquad R_{s1} = \frac{1030}{(57)^2} = 0.317\ \Omega \qquad X_{s1} = \sqrt{(0.737)^2 - (0.317)^2} = 0.665\ \Omega$$

وبالتالي:

$$R_1 = a^2R_2 = 0.158\ \Omega \qquad R_2 = 0.0395\ \Omega$$

$$X_1 = a^2X_2 = 0.333\ \Omega \qquad X_2 = 0.0832\ \Omega$$

من تجربة الدائرة المفتوحة:

$$\theta_0 = \cos^{-1}\frac{710}{(9.6)(220)} = \cos^{-1} 0.336 = -70^\circ$$

$$\mathbf{E}_2 = 220\underline{/0^\circ} - (9.6\underline{/-70^\circ})(0.0395 + j0.0832) \approx 219\underline{/0^\circ}\ \text{V}$$

$$P_{c2} = 710 - (9.6)^2(0.0395) \approx 710\ \text{W}$$

$$R_{c2} = \frac{(219)^2}{710} = 67.5\ \Omega$$

$$I_{c2} = \frac{219}{67.5} = 3.24\ \text{A}$$

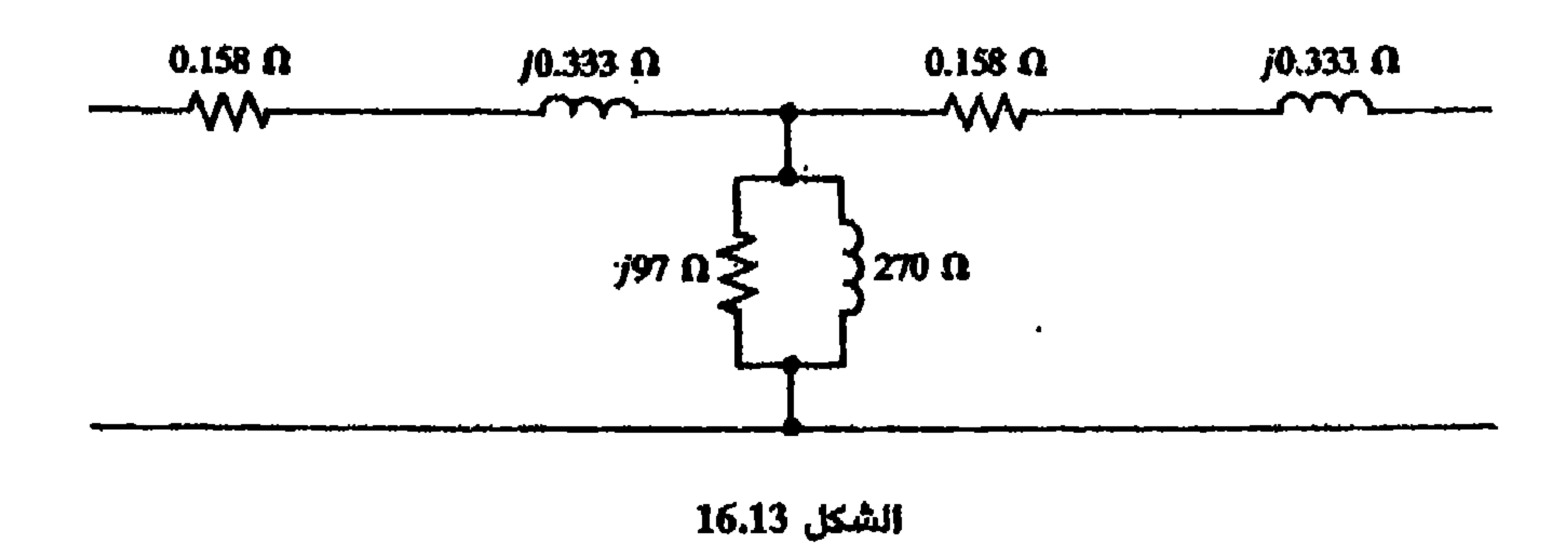
$$I_{m2} = \sqrt{(9.6)^2 - (3.24)^2} = 9.03\ \text{A}$$

$$X_{m2} = \frac{219}{9.03} = 24.24\ \Omega$$

$$X_{m1} = a^2X_{m2} = 97\ \Omega$$

$$R_{c1} = a^2R_{c2} = 270\ \Omega$$

فالدائرة المكافئة لها البارامترات المسجلة على الشكل 16.13:



الشكل 16.13

من معطيات التجربة في المسألة 11.13، أوجد قيم ثوابت الدائرة من أجل الدائرة المكافئة التقريبية منسوبة إلى طرف الجهد المنخفض.

تأخذ الدائرة مظهر الشكل 15.13 (ب) ولكن الآن:

$$R_{i2} = \frac{(220)^2}{710} = 68.2\,\Omega \quad (\text{مكان } 14\Omega)$$

$$I_{c2} = \frac{220}{68.2} = 3.22\text{ A}$$

$$I_{m2} = \sqrt{(9.6)^2 - (3.22)^2} = 9.04\text{ A}$$

$$X_{m2} = \frac{220}{9.04} = 24.33\,\Omega \quad (\text{مكان } 3.92\Omega)$$

القيم المحسوبة تجربة الدائرة المقصورة (في المسألة 11.13) يجب ان تنسب إلى الثانوية، أي

$$R_{s2} = \frac{0.317}{4} = 0.079\,\Omega \quad (\text{مكان } 0.041\Omega)$$

$$X_{s2} = \frac{0.665}{4} = 0.1666\,\Omega \quad (\text{مكان } 0.248\Omega)$$

محول $220V/110-V$، $60\ Hz$ له ضياع كلي دون الحمل قدره 800 W عندما يسحب تياراً قدره 3.5 A عند الجهد 220V مقاومة اللفافة الأولية 0.54 من المعطيات المحددة من قبل الصانع حول اضياعات، وجد أن كمية الضياع التخلفي عند التردد 60 Hz هي 520 W. إذا كانت قيم جهد وتردد العمل مضاعفتان، احسب ضياعات النواة الجديدة.

تعطي ضياعات النواة في محول، بشكل تقريبي، بالعلاقتين التقريبيتين:

فقد التيار الأمامي $\equiv p_e = k_e f^2 B_m^2 (W/kg)$

فقد التخلف $\equiv Ph = k_h f B_m^V (W/kg)$

حيث K_e وK_h ثوابت تتعلق بالمادة، f تردد التدفق المتناوب، B_m الكثافة العظمى للتدفق في النواة، والأسس v يتراوح بين 1.5 و2.5 الآن، تنص علاقة القوة المحركة الكهربائية (13.13) على أن Bm تتناسب مع E/f أي أن Bm تبقى ثابتة عندما يزداد كل من الجهد والتردد بنفس العامل (وخاصة بعمل 2) عند 220 V و60 Hz، لدينا

الضياعات I_2R بدون حمل $= (5.3)^2(0.54) = 6.6\ W$

$P_h = 520W$

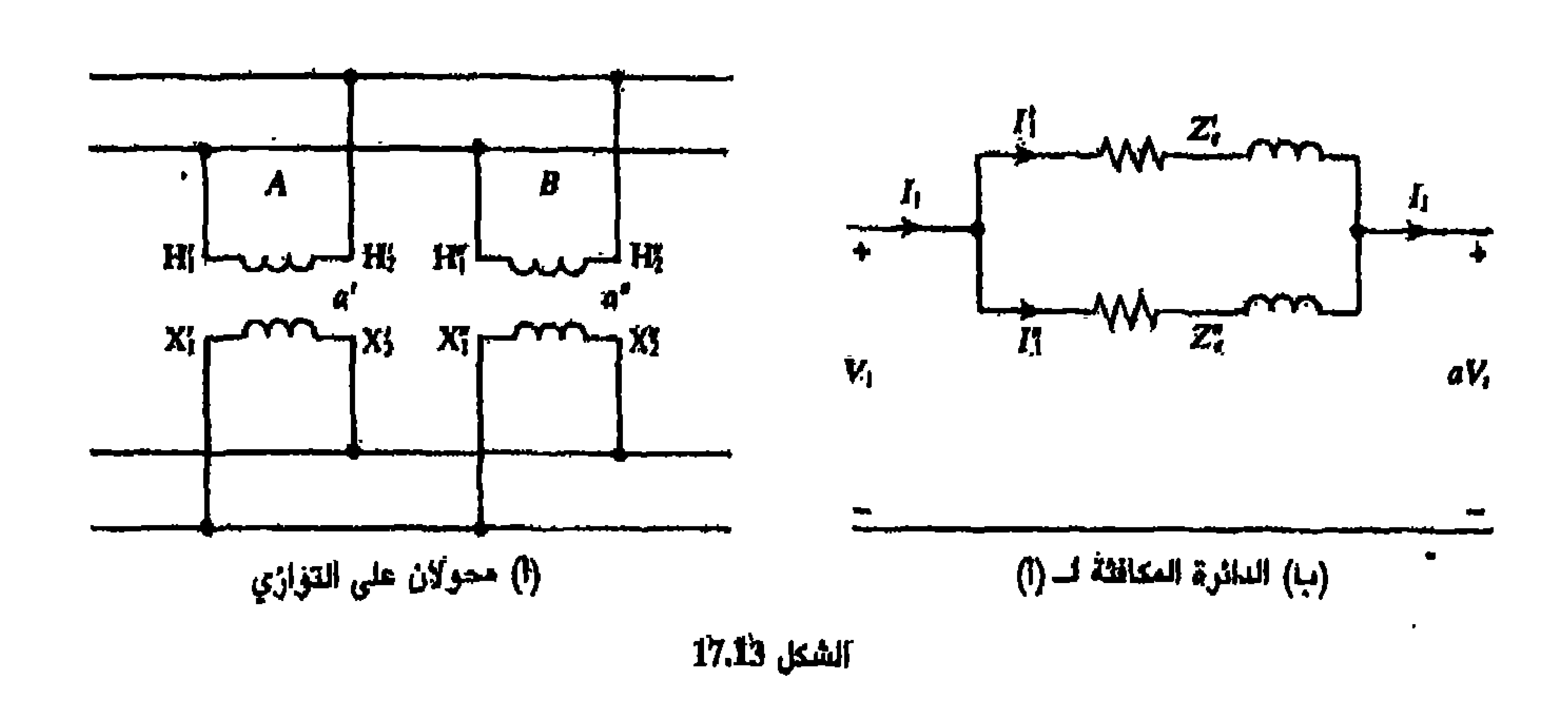
$P_e = 800 - (520 + 6.6) = 273.4\ W$

بالتالي، عندما 440 V و120 Hz

$P_e = 2^2(273.4) = 1094W$ $\qquad$ $P_h = 2(520) = 1040\ W$

والضياع الجديد $1094 + 1040 = 2134\ W$

محولان مع معاوقتين مكافئتين Z'_e وZ''_e تنسبان إلى الاوليتين. يعملان على التفرغ عند جهد طرفي الثانوي V_t وجهد طرفي الأولية V_1 [الشكل 17.13 (أ)] للمحولين نسبة لفات a' وa'' على الترتيب. إذا كان التيار الكلي في الأولي هي I_1، أوجد كيفية اقتسام الحمل بين المحولين. أهمل الضياعات وتيار المغنطة.



الشكل 17.13

الدائرة المكافئة للمحولين على التفرع مبينة بالشكل 17.13 (ب) ومنها نحصل على العلاقات الطورية التالية:

$$V_1 = V'_1 = a'V_t + I'_1 Z'_e$$
$$V_1 = V''_1 = a''V_t + I''_1 Z''_e$$
$$I_1 = I'_1 + I''_1$$

بإجراء عملية الطرح بين العلاقتين الأولى والثانية، وإجراء الحل المشترك مع الثالثة، نحصل على تيار الحمل:

$$I'_1 = \frac{-V_t(a' - a'') + I_1 Z''_e}{Z'_e + Z''_e} \qquad I''_1 = \frac{V_t(a' - a'') + I_1 Z'_e}{Z'_e + Z''_e}$$

محولان لهما المواصفات التالية 100 kVA، 11 000 V/2300V، تردد 60Hz، متصلان على شكل ديلتا مفتوحة عند طرفي الأولي والثانوي (أ) ما هو

الحمل الكلي تغذيته من بنك التحويل هذا (ب) يوصل مع بنك التحويل المذكور حمل ثلاثي الطور بشكل دلتا يعمل على 120 - kVA، A 2300 - V، بعامل قدرة 0.866 متأخر. كم يبلغ تيار الخط على طرف الجهد العالي؟

أ. الحمــل علــى دلتــا مفتــوح = $\sqrt{3}\times$ (معــدل KVA لكــل محــول) = $\sqrt{3}x100=173.2kVA$.

الدائرة والمخطط الطوري موضحة على الشكل 18.13.

ب. من أجل الحمل الموصول بشكل دلتا:

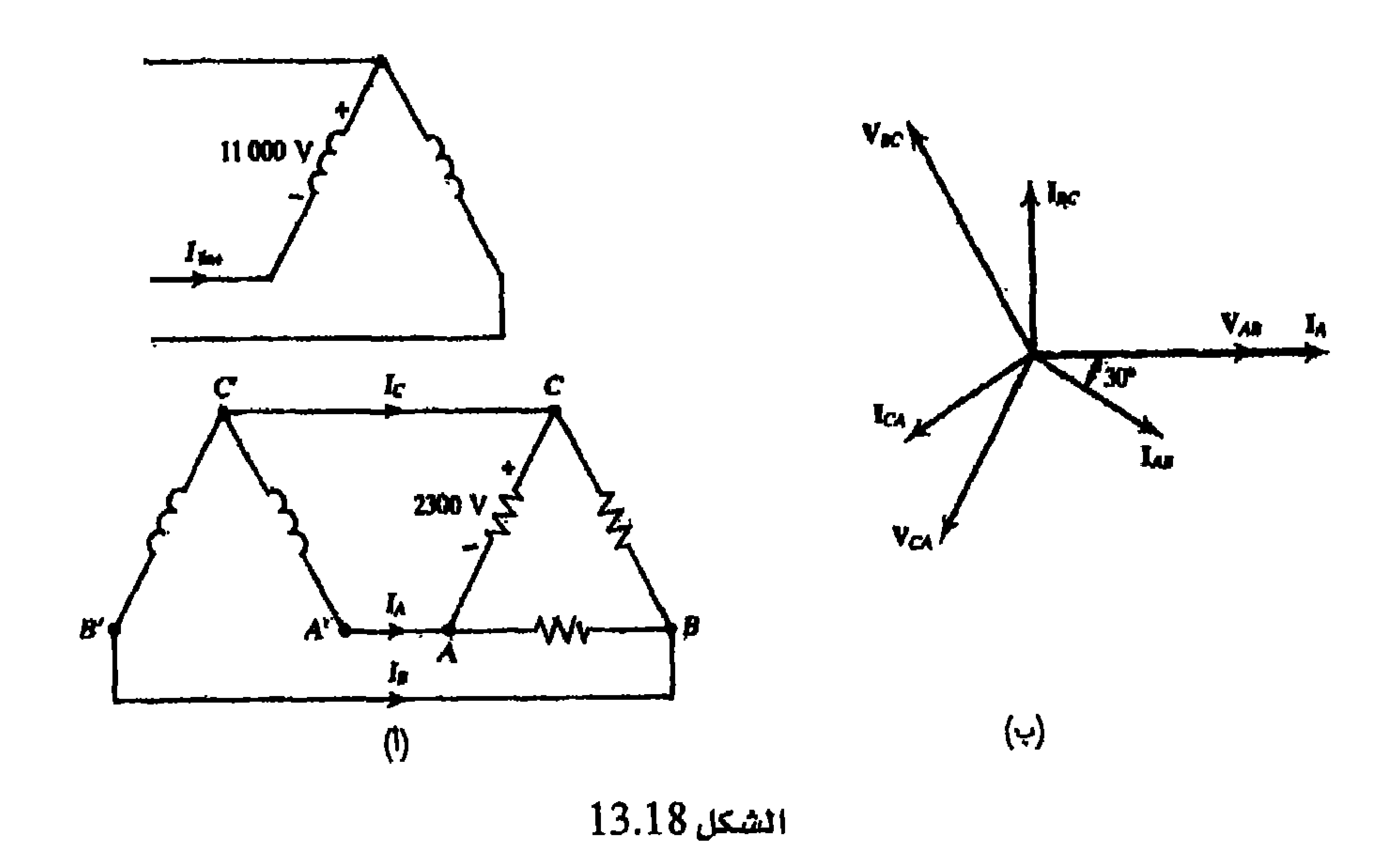
$$I_{AB}=I_{BC}=I_{CA}=\frac{1}{3}\left(\frac{120x10^3}{2300}\right)=17.4A$$

من المخطط الطوري شكل 18.13 (ب)

$$IA=IABC-ICA=\left(2x\frac{\sqrt{3}}{2}x17.4\right)\underline{/0^o}=30.12/\underline{0^o\ A}$$

نسبة $4.78=\frac{11000}{230}=a$ التحوّل

$\equiv I_{ince}$ التيار في اللغة $6.3A=\frac{30.12}{4.78}=11000-V$



الشكل 13.18

محول 25 – Hz، 120 – V/30 – V، 500 – VA يستخدم مع مصدر 60 – Hz. إذا لم تتغير كثافة تدفق النواة أوجد (أ) الجهد الأعظم المسموح في الأولي. (ب) معدل الجهد الجديد المقدر (60 – Hz) والتيار المقدر في الثانوي.

أ. من علاقة emf يتعلق جهد الأولي مباشرة مع تغير التردد، أي: الجهد الأعظم في الأولي:

$$\text{الجهد الأولي الأعظم} = \frac{60}{25}(120) = 288V$$

$$\text{قيمة } V2 = \frac{60}{25}(30) = 72V$$

$I_2 = \frac{500}{30} = 16.67A$ (قيمة I_2 المقدرة: وهو نفسه عند 25 Hz)

يعبر عن كمية ما بالتجزئة (لكل واحدة) إذا كانت مقسومة على كمية أساس (أي لها نفس الأبعاد الفيزيائية). افرض أننا اخترنا لمحول مواصفات 10 – kVA، 2400 – V/240 – V القيم التالية:

$P_{base} = 10\ kW \qquad V_{2,base} = 240\ V \qquad V_{1,base} = 2400\ V$

لهذا المحول المعطيات التجريبية التالية:

تجربة الدائرة المفتوحة (على طرف الجهد المنخفض): 240V، 0.8 A، 80 W

تجربة الدائرة المقصورة (على طرف الجهد العالي): 80 V، 5.1 A، 220 W.

يطلب تحويل جميع معطيات التجربة إلى قيم (لكل قطعة) وإيجاد المقاومة المكافئة التسلسلية لكل واحدة.

$$I_{2,base} = 41.7\ A \qquad I_{1,base} = \frac{10 \times 10^3}{2400} = 4.17\ A$$

في حالة واحدة، معطيات الدائرة المفتوحة هي:

$$P_0 = \frac{80}{10 \times 10^3} = 0.008\ pu \qquad I_0 = \frac{0.8}{41.7} = 0.019\ pu \qquad V_0 = \frac{240}{240} = 1\ pu$$

ومعطيات دائرة القصر:

$$P_s = \frac{220}{10 \times 10^3} = 0.022\ pu \qquad I_s = \frac{5.1}{4.17} = 1.22\ pu \qquad V_s = \frac{80}{2400} = 0.0333\ pu$$

المقاومة المكافئة:

$$R_e = \frac{Ps(pu)}{[Is(pu)]^2} = \frac{0.022}{(1.22)^2} = 0.0148\,pu$$

محول له المواصفات: 75 – kVA، 230 – V/115 – V، 60 – Hz وله المعطيات التجريبية التالية:

تجربة الدائرة المقصورة 9.5 V، 326A، 1200W

تجربة الدائرة المفتوحة 115V، 16.3A، 750W

أوجد (أ) المعاوقة المكافئة بدلالة الجهد العالي. (ب) المعاوقة المكافئة (لكل واحدة). (ج) تنظيم الجهد عند الحمل المقدر مع معامل قدرة 0.8 متأخر. (د) الفعالية (المردود) عند الحمل المقدر مع معامل قدرة 0.8 متأخر وعند نصف الحمل مع معامل قدرة يساوي الواحد.

(أ)
$$Z_s = \frac{9.5}{326} = 0.029\ \Omega$$

(ب) نتابع كما في المسألة 17.13

$$\text{لكل وحدة } V_s = \frac{9.5}{230} = 0.0413\ \text{pu}$$

$$\text{لكل وحدة } I_s = \frac{326}{326} = 1\ \text{pu}$$

$$\text{لكل وحدة } Z_s = \frac{V_s\ (\text{pu})}{I_s\ (\text{pu})} = \frac{0.0413}{1} = 0.0413\ \text{pu}$$

(ج)
$$\text{لكل وحدة } P_s = \frac{1200}{75 \times 10^3} = 0.016\ \text{pu} = [I_s\ (\text{pu})]^2 [R_s\ (\text{pu})]$$

(د)
$$R_s = 0.016\ \text{pu} \qquad X_s = \sqrt{(0.0413)^2 - (0.016)^2} = 0.0384\ \text{pu}$$

$$V_0 = V + IZ = 1 + (0.8 - j0.6)(0.016 + j0.0384)$$

إذا V0=1.036 وبالتالي:

$$\text{تنظيم الجهد} = \frac{V_0 - V_2}{V_2} = \frac{1.036 - 1}{1} = 0.036\,pu = 3.6\%$$

$$\eta_{\text{rated load}} = \frac{(75 \times 10^3)(0.8)}{(60 \times 10^3) + 1200 + 750} = 96.85\%$$

$$\eta_{1/2\,\text{rated load}} = \frac{(37.5 \times 10^3)(1)}{(37.5 \times 10^3) + 300 + 750} = 97.27\%$$

محول له نواة مقاومتها المغناطيسية R توصل مقاومة R على طرفي الثانوية. نسبة عدد اللفات N_1/N_2. التدفق في النواة ذو شكل جيبي له تردد زاوي قدره w. أوجد علاقة التيار اللحظي في الأولية بدلالة: N_1, N_2, w, R, R, والجهد المستحث في الأولية E_1.

اكتب $\phi = \phi_m \sin wt$ إذن:

$$e_1 = \omega N_1 \phi_m \cos \omega t \qquad e_2 = \omega N_2 \phi_m \cos \omega t \qquad (1)$$

يعطي تيار الثانوية بالعلاقة:

$$i_2 = \frac{e_2}{R} \qquad (2)$$

في الدائرة المغناطيسية، F=R ϕ، أو:

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = \mathscr{R} \phi_m \sin \omega t \qquad (3)$$

من (1) و(2) وبعد المعالجة:

$$i_1 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \frac{E_1}{R} \cos \omega t + \frac{E_1 \mathscr{R}}{\omega N_1^2} \sin \omega t$$

في محاول ذاتي، كالذي في الشكل 10.13 لدينا $Vi_n=V1=220$، $V_{out}=V2=110V$ و$I_{out}=12=10A$. قانون هذا المحوّل مع محوّل $220-V/110$ V – ثنائي اللفة الذي يوفر تيار 10A عند الثانوي. وذلك من ناحية كمية النحاس اللازمة لكل من المحولين.

تعمل لفائف المحول، بشكل عام، عند كثفاة تيار محددة. ما يجعل وزن النحاس في اللفافة متناسباً مع عدد دورات المبير (مع القوة المحركة المغناطيسية mmf) لذلك في المحول ذي الفافتين،

$$(\text{وزن النحاس}) = k(N_1I_1 + N_2I_2) \quad (1)$$

حيث K ثابت.

في المحول الذاتي، لدينا من الشكل 10.13:

عدد اللفات من A إلى $C = N_1$ التيار في $AB=Ii_n=I_1$

عدد اللفات من B إلى $C=N_2$ التيار في BC هو $I_1 - I_2$

عدد اللفات من A إلى B

هو $N_2 - N_1$

$$\text{إذن (وزن النحاس)} = k[(N_1 - N_2)I_1+N_2(I_2 - I_1)] \quad (2)$$

من (1) و(2):

$$\frac{\text{الوزن}_{auto}}{\text{الوزن}_{trans}} = \frac{(N_1 - N_2)I_1 + N_2(I_2 - I_1)}{N_1I_1 + N_2I_2} = 1 - \frac{2N_2/N_1}{1+(N_2/N_1)(I_2/I_1)} = 1 - \frac{2/a}{2} = 1 - \frac{1}{a}$$

وبما ان $N_1/N_2 = I_2/I_1=a$ إذن:

التوفير في النحاس = الوزن الأول – الوزن الثاني = $1/a$ وزن الأول.

بأخذ القيم العددية نجد: $\frac{1}{a}=\frac{N_2}{N_1}=\frac{100}{220}=0.5$

أي أن التوفير في النحاس يبلغ 50٪.

الفصل الرابع

الميكانيك الكهربائي والآلات الكهربائية

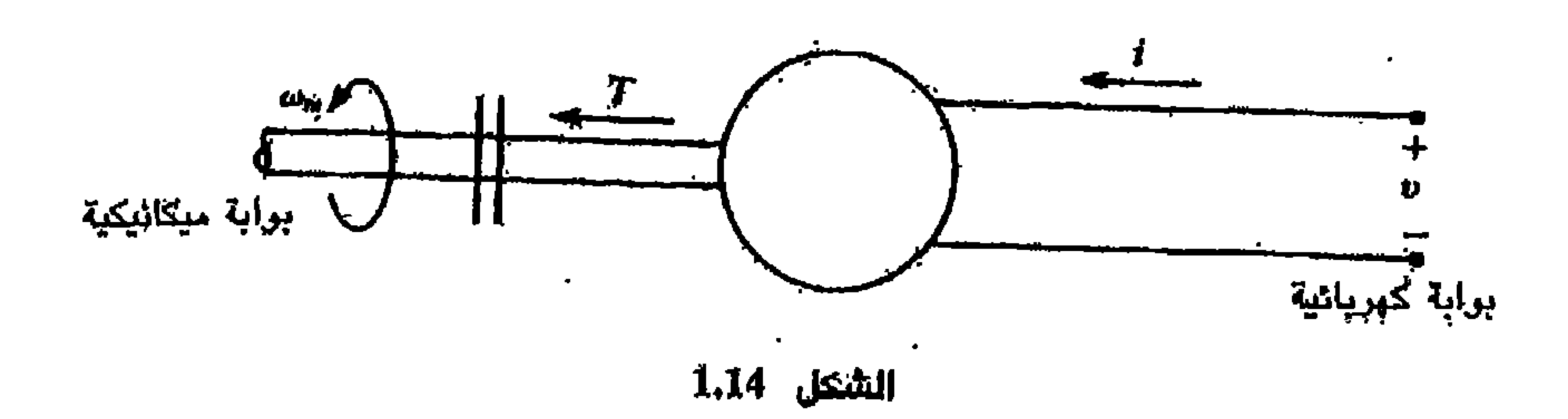
الميكانيك الكهربائي والآلات الكهربائية

مبادئ أساسية:

التحويل الكهربائي الميكانيكي للطاقة هو تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية، أو بالعكس. يبين الشكل 1.14 مخططاً لصندوق أسود، وهو لمحول طاقة دوار، لا ضياع فيه، يعبر عن تحويل الطاقة حسب العلاقة:

$$T_{wm} = vi \qquad (1.14)$$

حيث T تمثل العزم (مقدار بالنيوتن. متر) وW_m سرعة الدوران (الراديان لكل ثانية) عند المدخل الميكانيكي، وحيث v وi هما جهد وتيار المدخل الكهربائي.



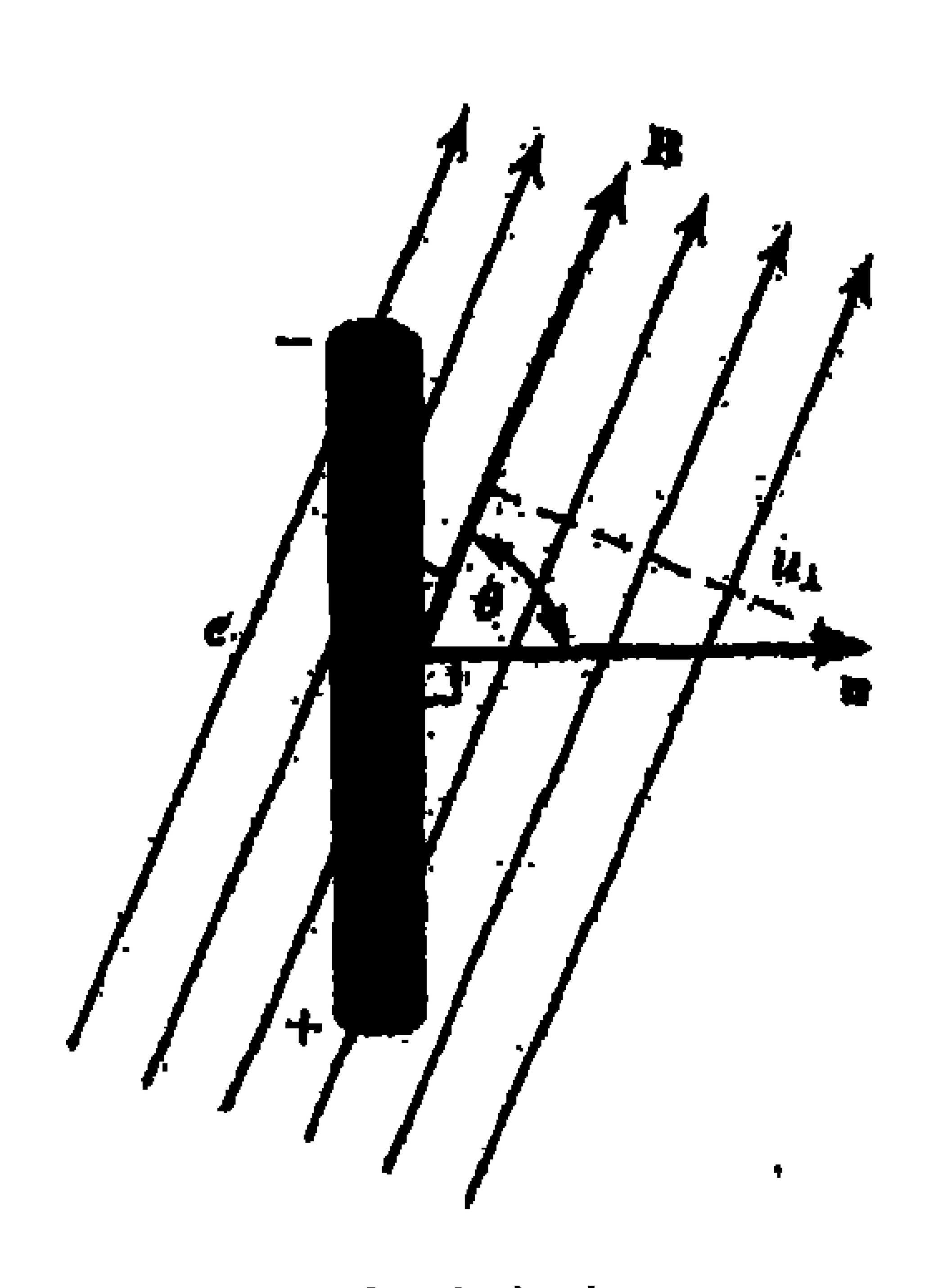
الشكل 1.14

إن العلاقة (1.14) هي مجرد عبارة تشير إلى التكافؤ بين القدرتين الميكانيكية والكهربائية، ولا تعطي تفاصيل عن عملية أو آلية تحويل الطاقة. المولدات الكهربائية، التي تحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية، تعمل على مبدأ قانون فارادي في الحث المغناطيسي. حسب قانون فارادي، يستحث جهد في موصل عندما يجتاز خطوط تدفق مغناطيسية، أو في دائرة، عندما يتغير التدفق الذي يقرن الدائرة، مع الزمن. يمكن التعبير عن هاتين النسختين من قانون فارادي، رياضياً، بالعلاقتين:

$$e = \ell u B \sin\theta = B\ell u \perp \qquad (2.14)$$

$$e = N\frac{d\phi}{dt} = \frac{d}{dt}(Li) \qquad (3.14)$$

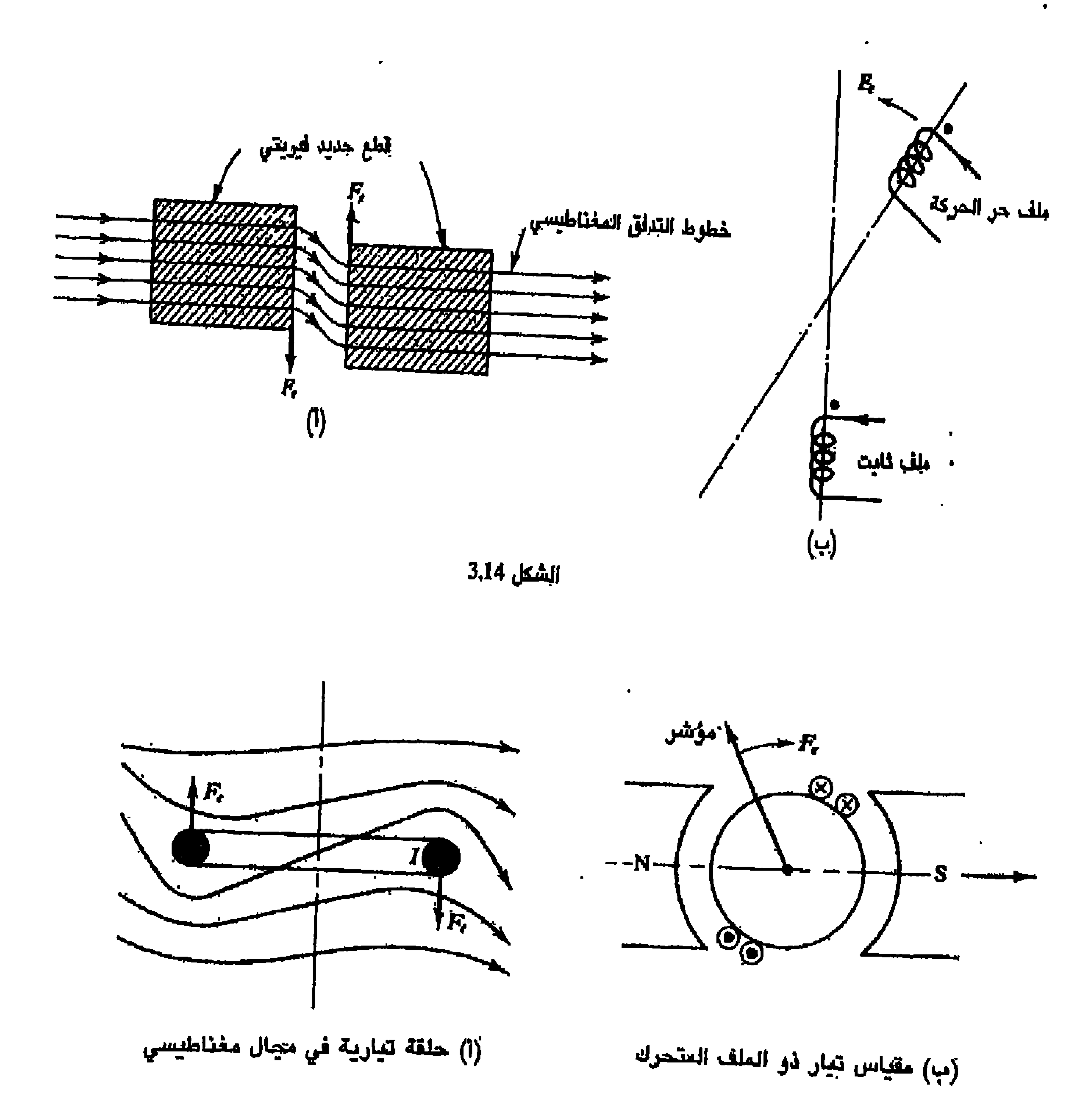
العلاقة (2.14) تلائم الوضع المشار إليه في الشكل 2.14 (ليس من الضروري أخذ الحالة الأعم بعين الاعتبار). هنا، لدينا موصل مستقيم طوله ℓ يتحرك بسرعة u ضمن مجال مغناطيسي منتظم B قاطعاً خطوط المجال B بزوايا قائمة. إن مركبة السرعة العمودية على المجال هي الوحيدة ذات التأثير، والتي تحث جهداً e، له القطبية المبينة بالشكل. لاحظ أنه إذا كانت $\theta=90^o$، تصبح (2.14) بالشكل $e = B\ell u$ وهي قاعدة "بي إل يو" المساواة الأولى في العلاقة (3.14) تمثل الحالة الأعم لقانون فارادي، فهي تشمل (2.14) عندتطبيقها على حالة الشكل 2.14 المساواة الثانية في العلاقة (3.14) ناتجة عن تعريف المحادثة (5.13).



الشكل 2.14

المحركات الكهربائية والقلابات الكهروميكانيكية، التي تحول الطاقة الكهربائية إلى ميكانيكية، تعمل إما على مبدأ (1) تقويم اصطفاف التدفق، أو (2) التفاعل المتبادل بين المجالات المغناطيسية والموصلات التي تحمل تياراً (قانون امبير)، هناك مثالان عن تقويم التدفق موضحان بالشكل 3.14 في الشكل 3.14 (أ) القوة المطبقة على قطع المغناطيس الفيريتي تؤدي إلى اصطفافها مع طوط التدفق، مؤدية بذلك إلى تقصير مسار التدفق المغناطيسي مما يخفض المقاصرة. يظهر

على الشكل 3.14 (ب) اصطفاف ملفين موصلين للتيار يعطي الشكل 4.14 امثلة عن التفاعل المتبادل بين الموصلات الحاملة للتيار والحقول المغناطيسية. هكذا في الشكل 4.14، (ب) تتشكل قوة من تفاعل خطوط التدفق وتيار الملف مؤدية لنشوء عزم يطبق على الملف.



الشكل 3.14

الشكل 4.14

معادلات القوى والعزم في أنظمة الحركة المتزايدة:

في حين تمثل المحركات والمولدات أجهزة ذات حركية عالية، نجد أن القلابات الكهروميكانيكية هي أجهزة ذات حركية متزايدة بمعنى ان حركتها

مقيدة (تقتصر على انتقالات صغيرة). كمثال، الغشاء الداخلي في مكبر الصوت (يعالج الطاقة الكهربائية ويحول إلى شكل ميكانيكي)، له حركة صغيرة جداً مقارنة بحركة المحرك الكهربائي. وكذلك، اللفافة الكهرطيسية، تتبع لأجهزة الحركة المتزايدة. يمكن تحديد قيمة القوى الميكانيكية ذات المنشأ الكهربائي في هذا النوع من الأجهزة، اعتماداً على مبدأ انحفاظ الطاقة، كما توضحه الأمثلة التالية:

مثال 1.14: في أية منظومة كهروميكانيكة خالية من الضياع (مصونة):

(الدخل من الطاقة) = (العمل الميكانيكي الذي تنجزه المنظومة)+(الزيادة في الطاقة المختزنة) (1)

في الحالة الخاصة، حيث يجذب مغناطيس كهربائي كتلة من الحديد، كما في الشكل 5.14 (أ) الذي فيه (1) (2) يمثلان الوضعية الابتدائية والنهائية لكتلة الحديد التي تعرضت للانتقال مسافة $-dx$ بعكس الاتجاه الموجب للمحور x إذا بقي تيار الملف ثابتاً على القيمة $i=I_0$ خلال الحركة من (1) إلى (2) بينما $\lambda(=N\phi)$ تغير من λ_1 إلى λ_2، عندئذ، تعطي الطاقة الكهربائية للدخل، dW_e، من مصدر التيار، بقانون فارادي. العلاقة (3.14). العلاقة (3.14) بالشكل:

$$dW_e = I_0 e dt = I0(\lambda_2 - \lambda_1) \qquad (2)$$

التزايد في الطاقة (المغناطيسية) المختزنة، dW_m

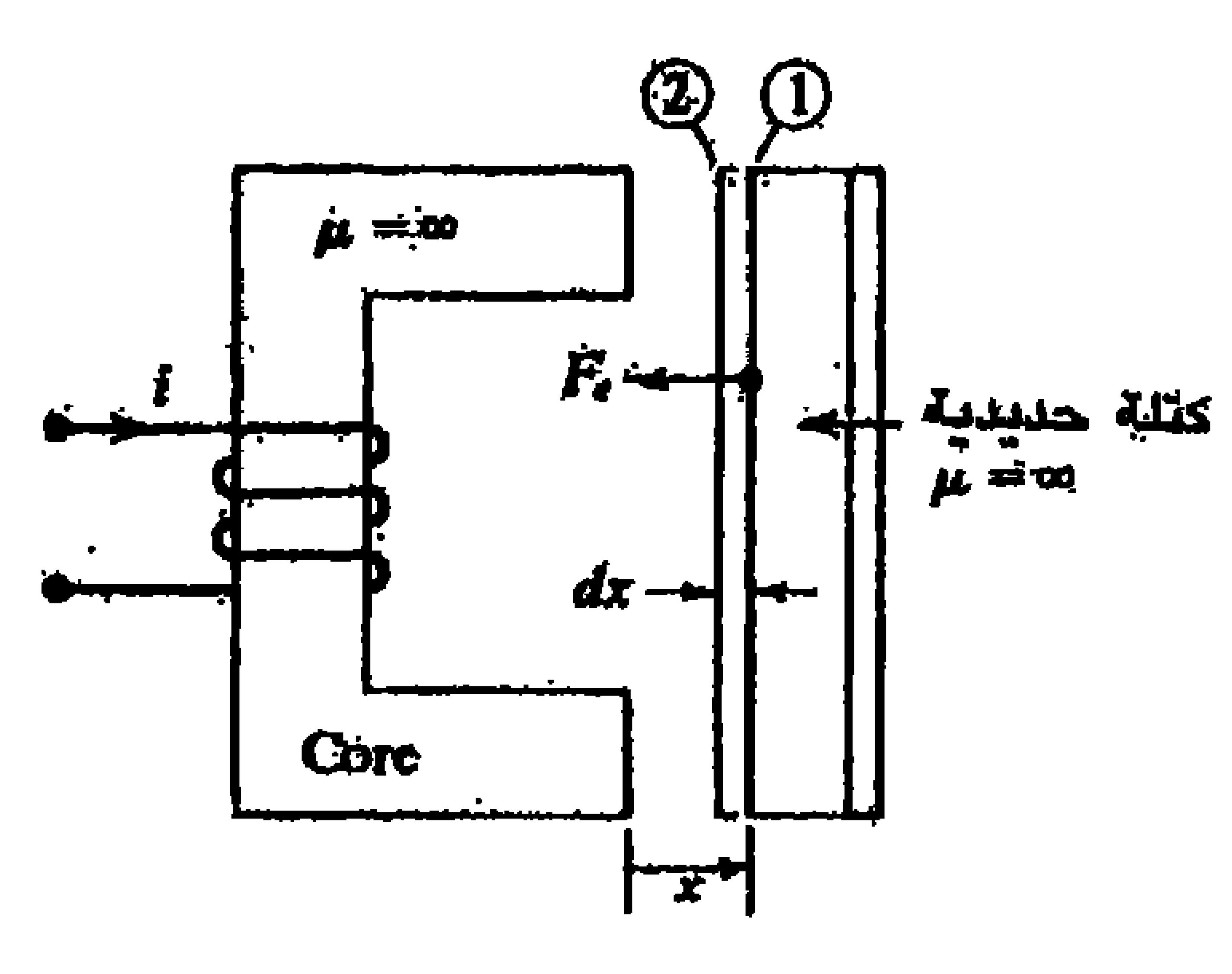
$$dW_m = \frac{1}{2}(L_2 - L_1)I_0^2 = \frac{1}{2}(\lambda 2 - \lambda 1)I_0 \qquad (3)$$

وحيث أننا افترضنا دائرة مغناطيسية خطية، $L = Ni$ من (1).

$$dW_a = (-F_e)(-dx) + dW_m \qquad (4)$$

حيث Fe هي القوة الناتجة كهربائياً. ومنه بالاعتماد على (2)، (3)، و(4).

$$F_e dx = \frac{1}{2}(\lambda 2 - \lambda 1)I_0 = dW_m \quad (5)$$



الشكل 5.14

إذا بقي، من جهة أخرى، ترابط التدفق ثابتاً عند $\lambda = \lambda_0$ خلال الحركة، نحل بدلاً من (2) و(3) على:

$$dW_e = 0 \quad (6)$$

$$dW_m = \frac{1}{2}\lambda_0(i_2 - i_1) \quad (7)$$

والتي، مع (4) تعطي:

$$F_e dx = -\frac{1}{2}\lambda_0(i_2 - i_1) = -dW_m$$

يمكننا إعادة صيغة (5) و(8) للمثل 1.14 بالشكل:

$$F_e = \frac{\partial W_m(i, x)}{\partial x} \quad (\text{أ}4.14)$$

$$F_e = -\frac{\partial W_m(\lambda, x)}{\partial x} \quad (\text{ب}4.14)$$

وهما شكلاً معادلة القوة، نحصل منهما على قيمة القوة الميكانيكية ذات المنشأ الكهربائي. في منظومات الحركة الدورانية (سواء ذات الحركة المتزايدة أو العالية)، التعابير المشابهة التي تعطي العزم هي:

$$T_e = \frac{\partial W_m(i, \theta)}{\partial \theta} \qquad (\text{أ}5.14)$$

$$T_e = -\frac{\partial W_m(\lambda, \theta)}{\partial \theta} \qquad (\text{ب}5.14)$$

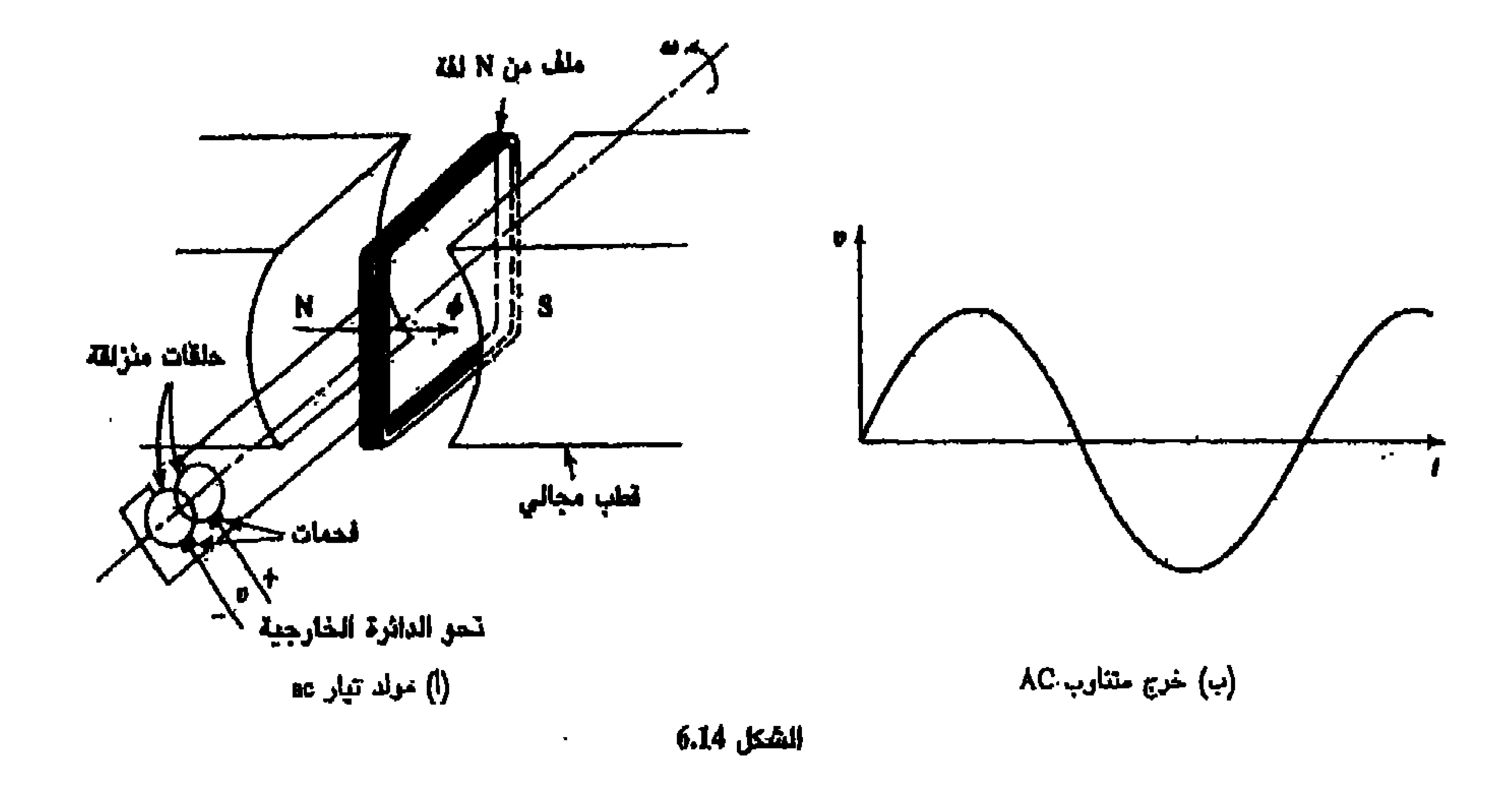
يمكن استخدام أي من المجموعتين (14.14أ)، (4.14 ب) أو (5.14)، (5.14ب) في الدوائر المغناطيسية الخطية.

الآت التيار dc المولدات والمحركات:

كما وجدنا في الفقرة 1.14 يعتمد على المولدات على قانون فارادي في الحث الكهرومغناطيسي. تطبيق العلاقة (2.14) أو (3.14) على ملف مستطيل مؤلف من n لفة، طول محور ℓ ونصف قطره r ويدور بسرعة زاوية ثابتة w ضمن مجال مغناطيسي منتظم B كما في الشكل 6.14 (أ) يعطي:

$$e = 2BN\ell rw\sin wt = BNAw\sin wt \qquad (6.14)$$

الشكل الثاني للعلاقة (6.14) ينطبق علىملف مسطح لا على التعيين سطحه A يظهر جهد v=e على الحلقات المنزلقة (أو الفحمات)، كما بالشكل 6.14 يتحدد اتجاه الجهد المستحث، غالباً، باستخدام قاعدة اليد اليمنى، كما بالشكل 7.14 (أ) والتي تتوافق مع الشكل 2.14.

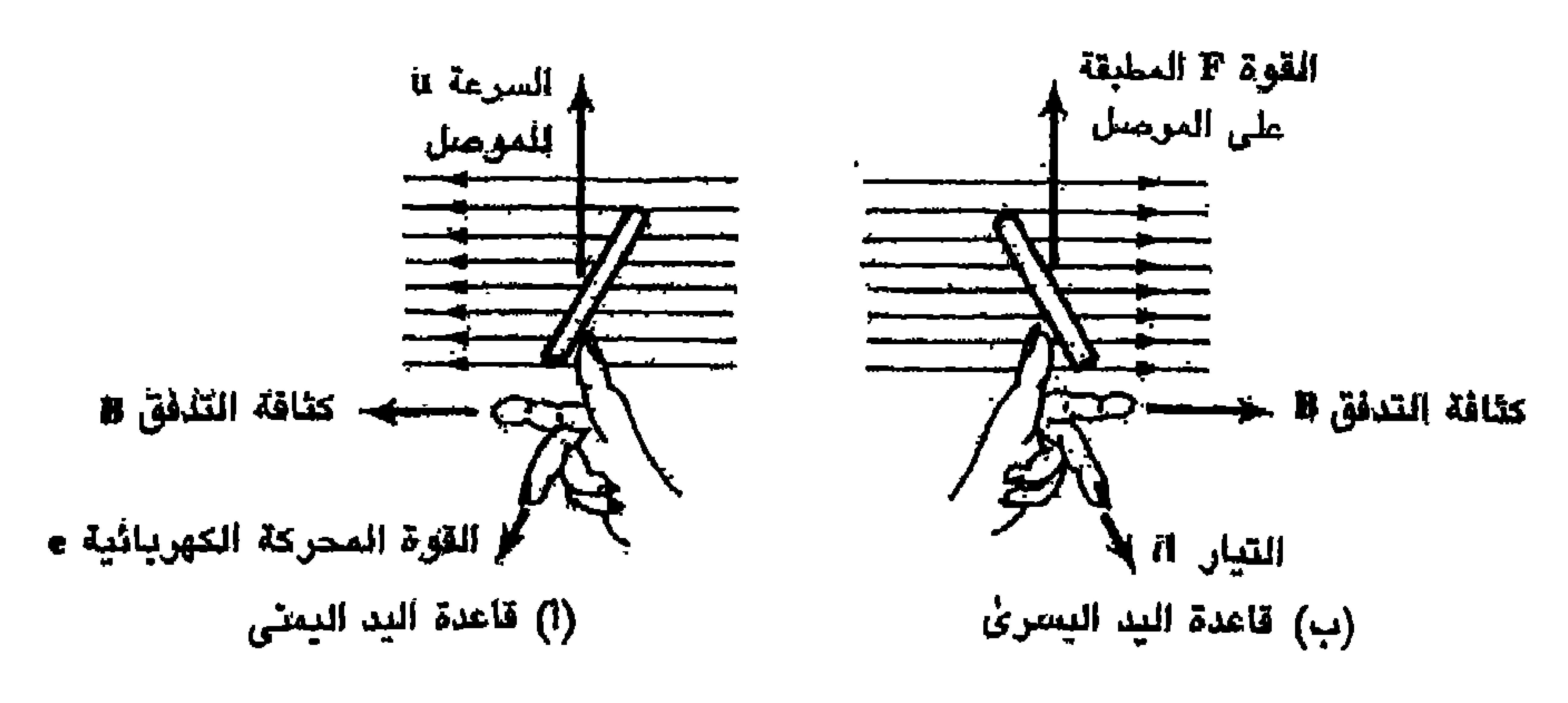


الشكل 6.14

يعتمد المحرك في حركته على قانون أمبير، والذي نكتبه حسب قاعدة بي إل آي:

$$f = B(\ell i)\perp \qquad (7.14)$$

تمثل F هنا مقدار القوة المطبقة على موصل يحمل عنصر تيار موجه i_1 والذي مركبته العمودية على المجال المغناطيسي المنتظم B هي $(\ell i)_\perp$ نحصل على اتجاه القوة من قاعدة اليد اليسرى: الشكل 7.14 (ب).

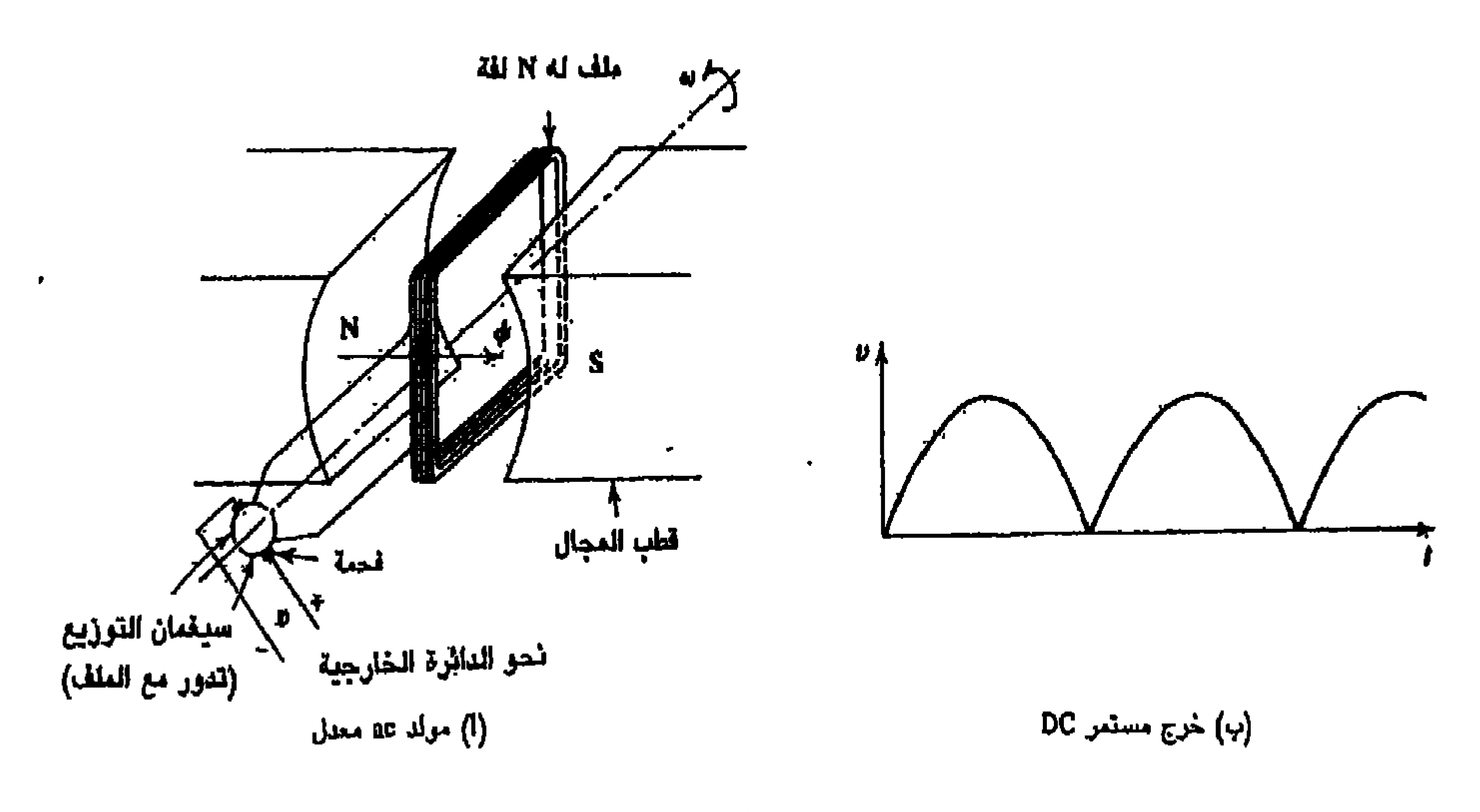


الشكل 7.14

تماما كما تم إنتاج جهد جيبي متاوب على طريق مولد، فإن العزم الناتج في الملف والمطبق على تماسات المنزلقتين (الفحمات) من مصدر مستمر، هو أيضاً ذو طبيعة متناوية وله قيمة متوسطة تساوي الصفر مع الزمن.

عمل الموزع:

من أجل الحصول عند الفحمتين على قطبية ذات اتجاه وحيد، أو للحصول على عزم من نفس الاتجاه، من ملف في مجال مغناطيسي، يتم تعديل آلية الفحمتين والحلقات المنزلقة، الشكل 6.14 (أ)، بحيث تصبح كما بالشكل 8.14 (أ). لاحظ هنا أنه بدل استخدام حلقتين منزلقتين، صار لدينا حلقة واحدة مقسومة إلى نصفين معزولين أحدهما عن الآخر. تنزلق الفحمتان على هذين النصفين، ويطلق عليهما سيغمان التوزيع (أو التبديل). يمكن التحقق من عملها مباشرة بتطبيق قاعدة اليد اليمنى، حيث أن جملة (الموزع / الفحمتين) هذه، تعطي عند الفحمتين قطبية محددة تماماً، مطابقة للشكل الموجي لجهد الخروج في الشكل 8.14 (ب). هذا الخرج المستمر عند الفحمتين له قيمة متوسطة لا تساوي الصفر مع تغير الزمن.



(أ) مولد ac معدل

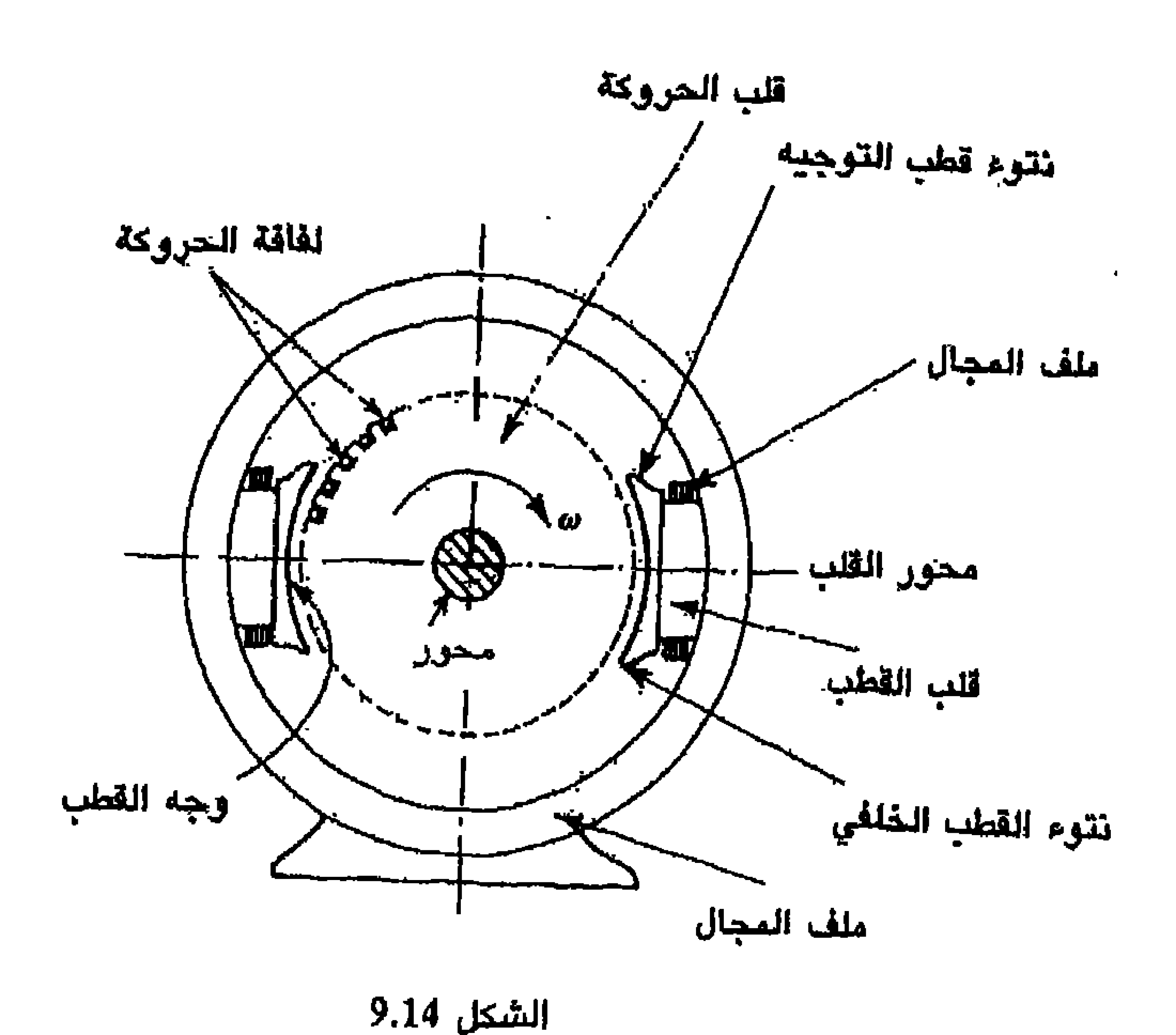
(ب) خرج مستمر DC

الشكل 8.14

كما يمكن التحقق، بتطبيق قاعدة اليد اليسرى، من أن تطبيق تغذية مستمرة على ملف موصول إلى جملة توزيع وفحمات، يؤدي للحصول على عزم باتجاه واحد.

لفائف الحروكة والمواصفات الفيزيائية:

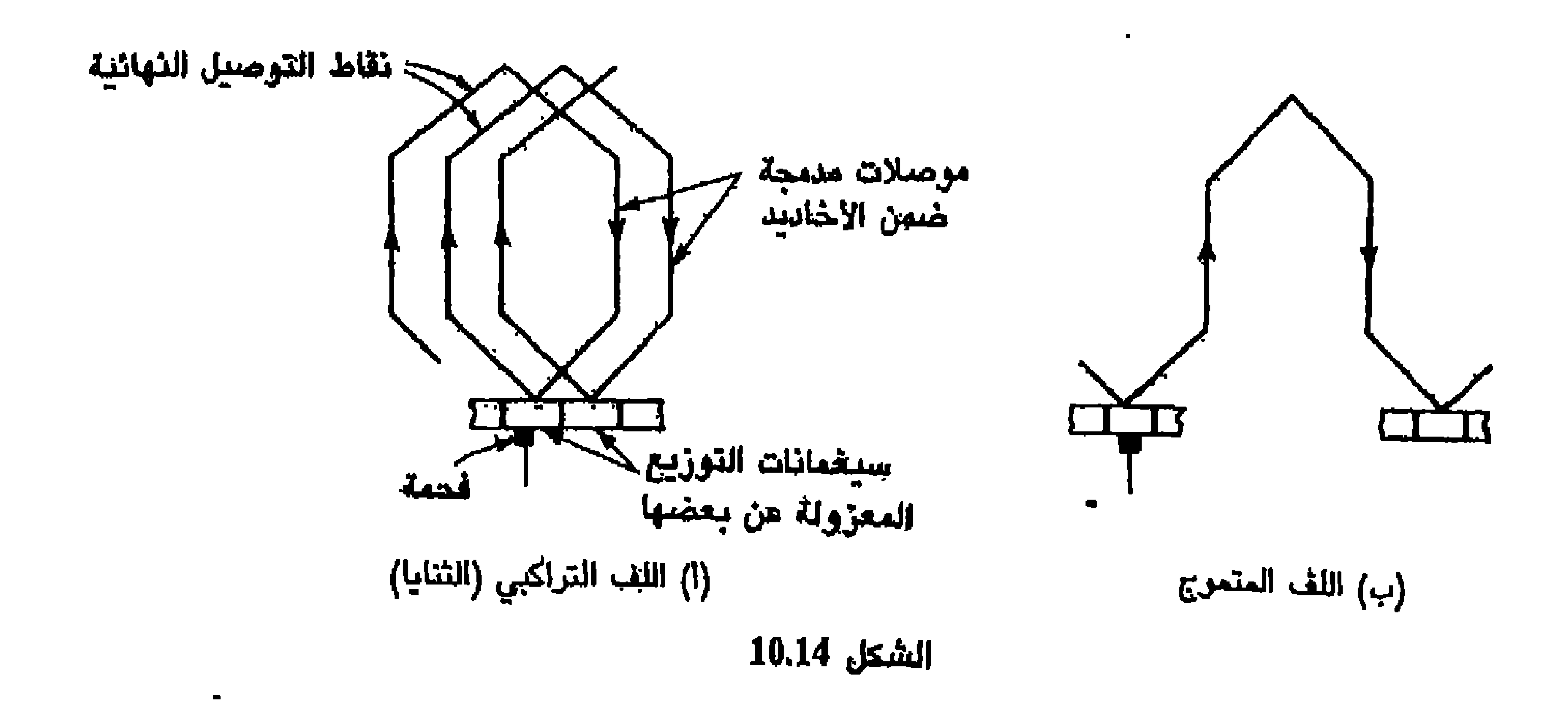
يبين الشكل 9.14 بعض الأجزاء الهامة والمواصفات الفيزيائية لآلة تيار dc أقطاب المجال الذي ينتج التدفق المطلوب، تثبت على الجزء الثابت (ونسميه: الثابت اختصارا). ويتضمن لفائف تسمى لفائف المجال أو ملفات المجال. بعض الآلات تشتمل على عدد من مجموعات لفائف المجال على نفس نواة القطب. لتسهيل تجميعها، تصنع نواة الأقطاب من صفائح رقيقة من الفولاذ. باعتبار لفائف المجال تمرر تياراً مستمراً، ليس من الضروري كهربائياً، تصفيح النوى، ولكن مع ذلك، يجب تصفيح أسطح القطب، بسبب قربها من لفائف الحروكة.



الشكل 9.14

إن نواة الحروكة، التي تحمل لفائف الحروكة، تكون عادة على الدوار، وتصنع عادة من الرقائق الفولاذية. يصنع الموزع من سيغمانات النحاس المسحوب

والمقسى ويعزل كل منها عن الآخر بمادة الميكا. كما هو موضح بالشكل 10.14 توصل لفائف الحروكة مع سيغمانات الموزع، التي تنزلق فوقها الفحمات وتقوم بدور الدليل نحو الوصلة الكهربائية. لفائف الحروكة هي اللفائف التي يقع عليها الحمل.



الشكل 10.14

يمكن للفائف الحروكة أن تكون على أحد شكلين، لفائف الثنايا – الشكل 10.14 (أ) أو لفائف التموج، الشكل 10.14(ب). ويمكن أن يتم وصل الملفات المختلفة التي تشكل لفائف الحروكة، بشكل مختلط بين متواز وتسلسلي. لقد تبين أن في وصل الثنايا، يكون عدد المسارات على التفرع، a، مساويا عدد الأقطاب p، بينما في لفائف التموج، يكون عدد المسارات المتوازية 2 دوما.

معادلة القوة المحركة الكهربائية:

ليكن لدينا موصل يدور بسرعة n دورة بالدقيقة rpm في مجال من p قطب، وله تدفق Φ لكل قطب. التدفق الكلي الذي يقطعه الموصل في n دوره هو pΦn إذن، التدفق الذي تم قطعه (اجتيازه) بالثانية، يعطي الجهد المستحث e بالشكل:

$$e = \frac{p\phi n}{60}(V) \qquad (8.14)$$

إذا كان هناك Z موصلا على الحروكة، موصلة في a مسرى متوازٍ، يكون العدد الفعلي من الموصلات على التسلسل هو z/a والتي تعطي جهداً كلياً E في لفائف الحروكة. إذن من أجل اللفافة الكلية، تعطي العلاقة (8.14) معادلة القوة المحركة الكهربائية

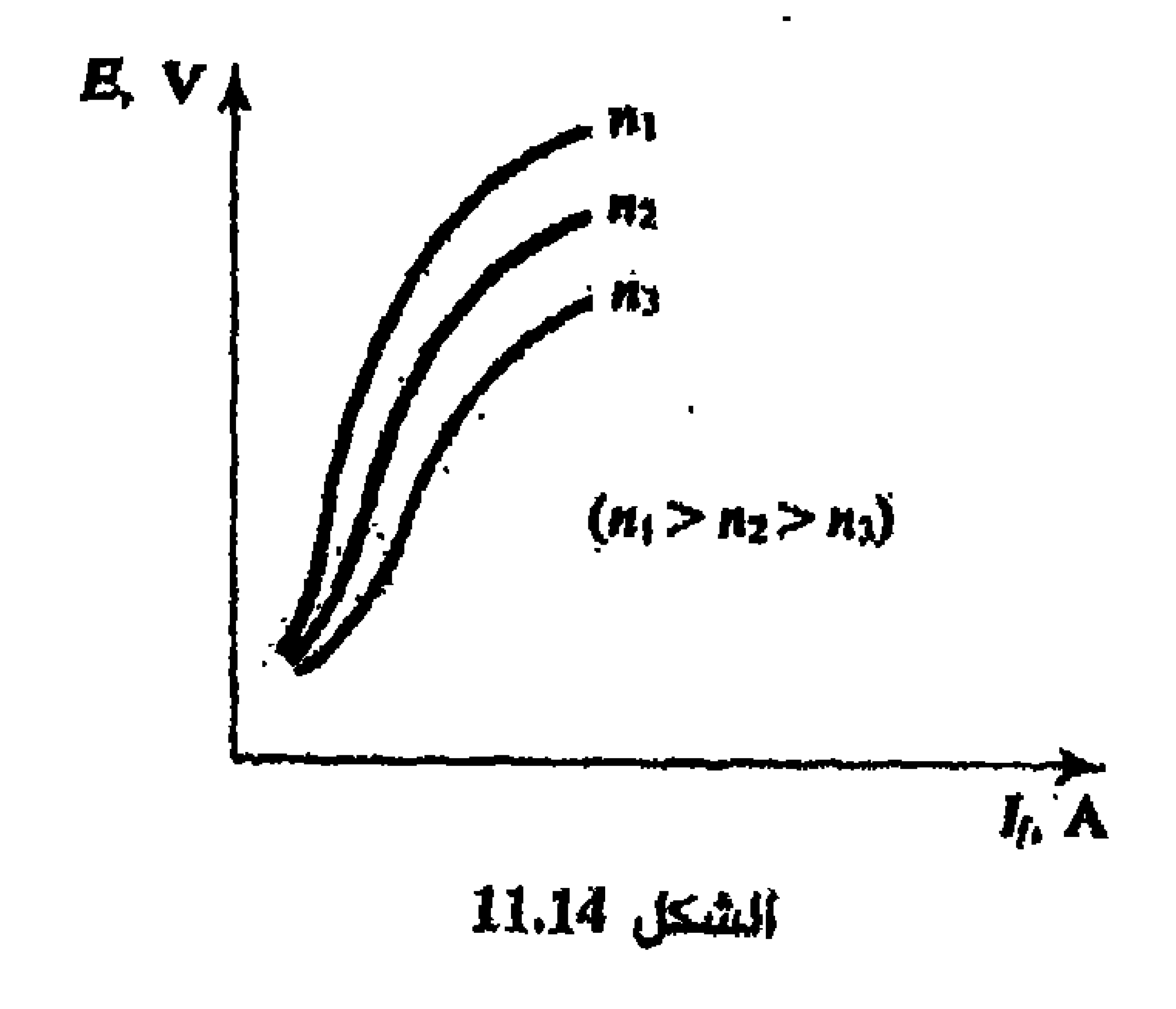
حيث $wm=2\pi n/60(rad/s)$ والثابت (بلا واحدة) و$ka=zp/2\pi a$ إذا كانت الدائرة المغناطيسية خطية (أي إذا لم يكن فيها إشباع) عندئذ:

$$\phi = k_f i_f \qquad (10.14)$$

حيث أن i_f هو تيار المجال k_f ثابت التناسب. تصبح (9.14) بالشكل:

$$E = k i_f wm \qquad (11.14)$$

حيث $k=k_f k_a(\Omega.s)$، هو ثابت. في الدائرة المغناطيسية اللاخطية تكون علاقة E مع I_f منحنياً غير خطي من أجل سرعة معينة، كما بالشكل 11.14.



الشكل 11.14

معادلة العزم:

القدرة الميكانيكية التي تخلقها الحروكة هي T_eW_m، حيث T_e هو العزم (الكهروميكانيكي) وW_m هي السرعة الزاوية للدوران الحروكة. إذا حصل هذا العزم

عندما كان تيار الحركة i_a بينما الجهد (المستحث) في الحروكة هو E، عندئذ تكون قدرة الحروكة هي Ei_a. وهكذا بإهمال أية ضياعات في الحروكة: $T_e w_m = Ei_a$، والتي تصبح، اعتماداً على (9.14) بالشكل:

$$T_e = k_a \phi i_a \qquad (12.14)$$

وهي ما يعرف بمعادلة العزم. في دائرة خطية، تصبح (10.14) و(12.14) بالشكل:

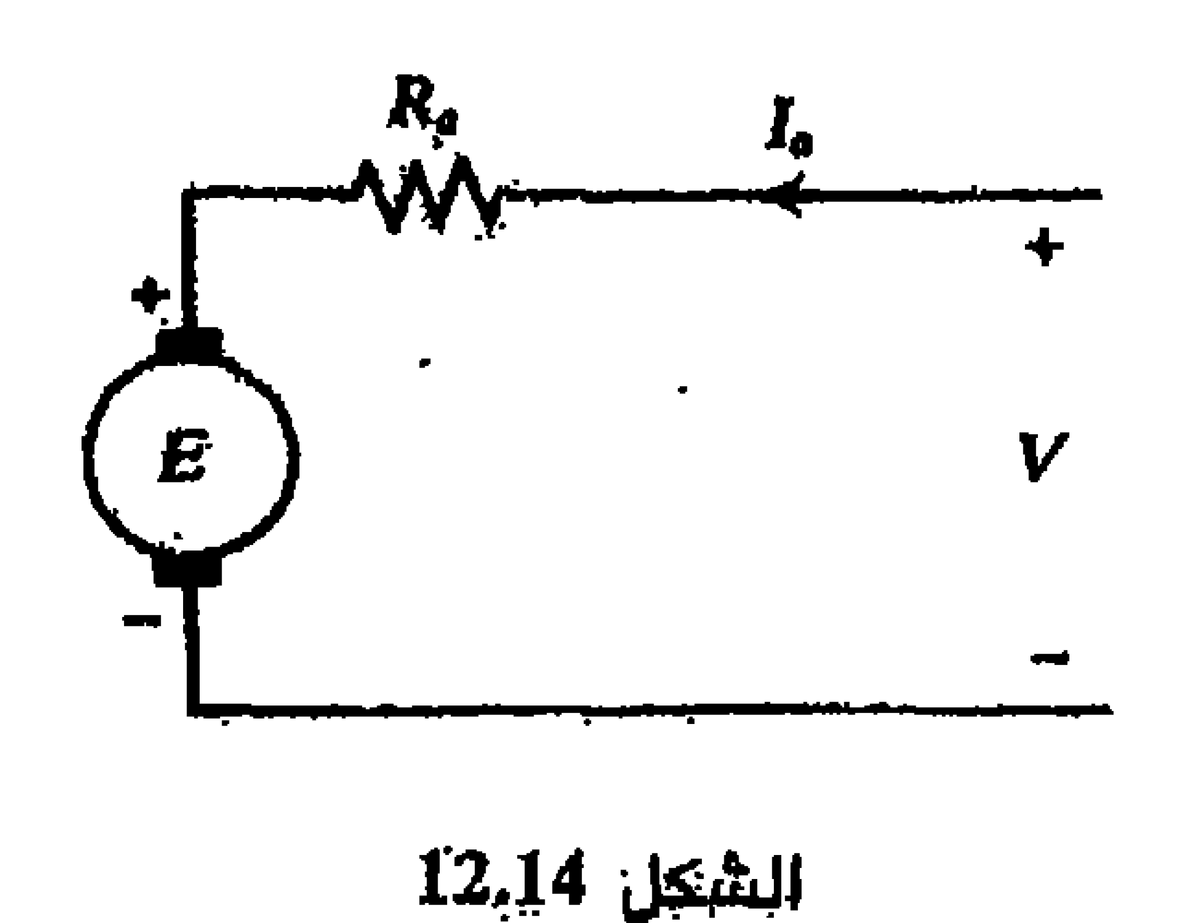
$$T_e = k i_f i_a \qquad (13.14)$$

حيث $k \equiv k_f k_a$ كما في (11.14) إذن يمكن أن يصطلح على تسميتها ثابت تحويل الطاقة الكهروميكانيكي، لاحظ أن العلاقات (10.14) حتى (13.14) مكتوبة بأحرف صغيرة، وذلك لأنها تعبر عن قيم لحظية. إلا أن هذه العلاقات محققة أيضاً تحت الحالة المستقرة.

معادلة السرعة:

يمكن تمثيل الحروكة في محرك تيار مستمر، تفصيلياً. كما بالشكل 12.14 تحت شروط الحالة الثابتة:

$$V - E = I_a R_a \qquad (14.14)$$



الشكل 12.14

بدل (19.14) في 14.14 فينتج:

$$\omega_m = \frac{V - I_a R_a}{k_a \phi} \qquad (15.14)$$

(أ) إثارة مستقلة

(ب) تفرعي

(ج) تسلسلي

(د) مركّب تراكمي

(هـ) مركّب تفاضلي

(و) تفريعة طويلة

(ز) تفريعة قصيرة

الأشكال 13.14

والتي تصبح في دائرة مغناطيسية خطية: $\omega_m = \frac{V - I_a R_a}{k I_f}$

الشكل البديل للعلاقة (16.14) هو: $n = \frac{V - I_a R_a}{k_m I_f}$ (rpm)

حيث km≡k/60(Ω.min). تعرف العلاقتان (16.14) أو (17.14) بمعادلتي السرعة.

تصنيف الآلات:

يمكن تصنيف آلاف التيار DC وفقاً لطريقة الاتصال المتبادل بين لفائف الحروكة والمجال كما بالشكل 13.14.

الضياعات والمردود:

بالإضافة إلى مميزات الفولط – أمبير ومميزات السرعة– عزم، هناك أداء التيار dc ويقاس بالمردود، ويعطى بالعلاقة:

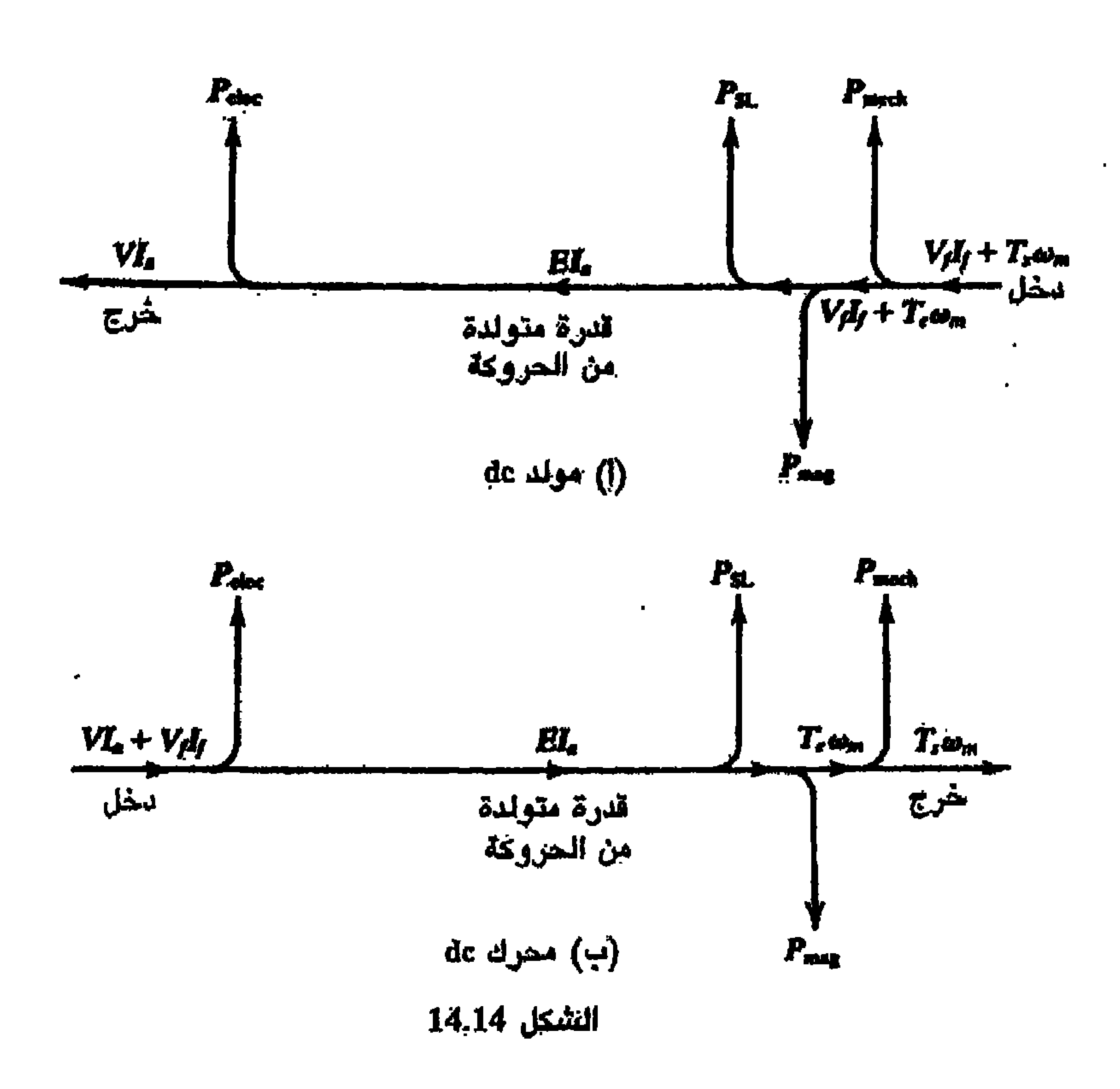
$$\text{المردود} = \frac{\text{قدرة الخرج}}{\text{قدرة الدخل}} = \frac{\text{قدرة الخرج}}{\text{قدرة الخرج + الضياعات}} \qquad (18.14)$$

لذلك يمكن تحديد المردود إما من اختبارات الحمل أو من تحديد الضياعات. تصنف الضياعات بأنواعها كما يلي:

- ضياعات كهربائية: (1) الضياعات في النحاس في مختلف اللفات، كلفائف الحروكة ولفائف المجال المختلفة (2) ضياعات ناتجة عن مقاومات التماس في الفحمات والمنزلقات (مع الموزع).
- ضياعات مغناطيسية: وهي ضياعات في الحديد ناتجة عن ضياعات تخلفية وضياعات دوامية في مختلف الدوائر المغناطيسية وبشكل أساسي في نواة الحروكة وأسطح الأقطاب.

- ضياعات ميكانيكية: وتتضمن الضياعات في احتكاك البيليات (كرات الاستناد) وضياعات نتيجة حركة الهواء ونتيجة تماس الفحمات.
- ضياعات شرود الحمل: هي ضياعات الحمل التي لم تذكر أعلاه – تعتبر قيمتها – كقاعدة 1٪ من الخرج.

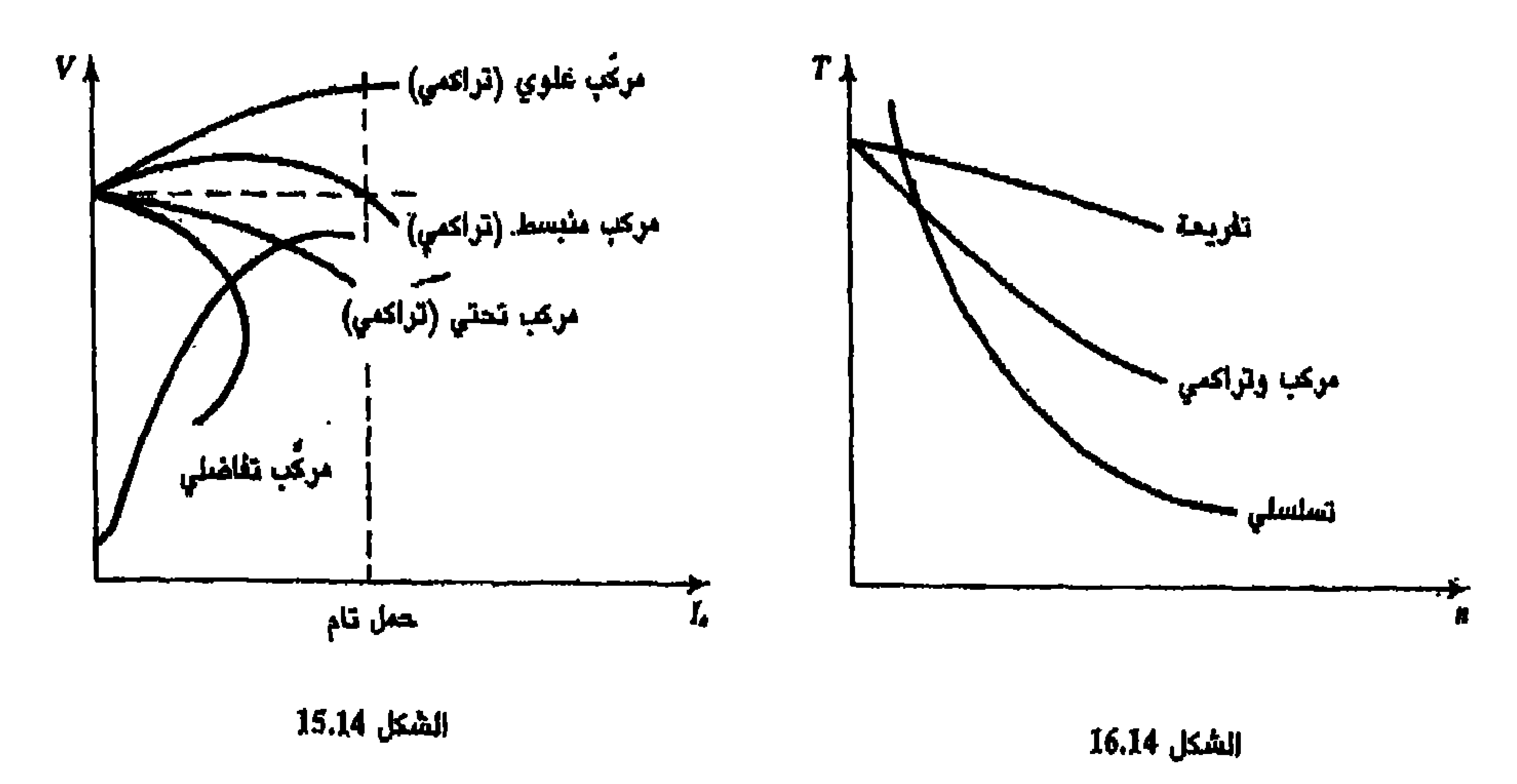
يمكن تمثيل تدفق القدرة في محرك أو مولد للتيار dc كما بالشكل 14.14 الذي فيه T_s ترمز إلى عزم محور الدوران:



الشكل 14.14

مميزات المحرك والمولد:

تتمتع ميزة الحمل لكل من المحرك والمولد، عادة بأهمية بالغة في تحديد التطبيقات المكنة لهذه الآلات. كما أن الميزات بدون حمل تتمتع في بعض الحالات (كما بالشكل 12.14) ببعض الأهمية يبين (الشكل 15.14 والشكل 16.14) نموذجاً من ميزات الحمل لمحركات التيار dc.



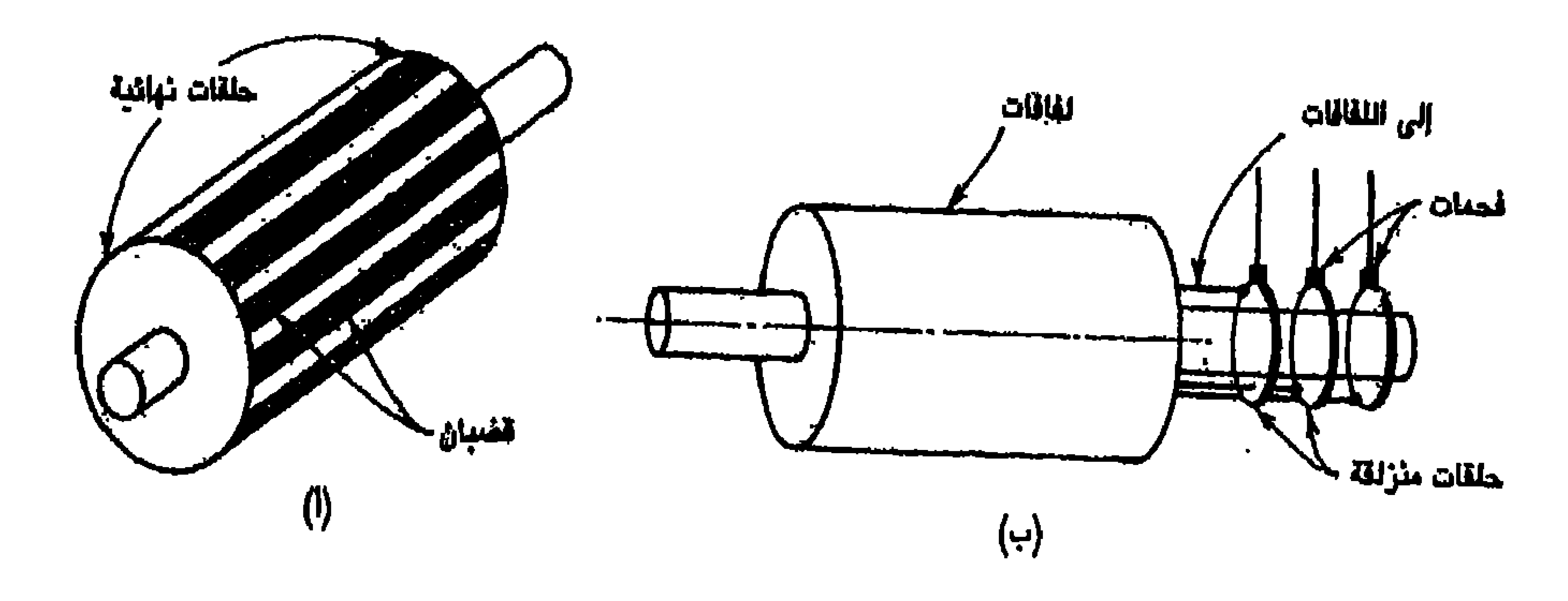
الشكل 15.14

الشكل 16.14

محركات الحث ثلاثية الطور:

قد تكون المحركات الحثية من أكثر المحركات شيوعاً. كما في محركات التيار dc، تتألف محركات الحث من ثابت ودوار، يستند هذا الأخير على كريات احتكاك ويكون معزولاً عن الثابت بفرجة هوائية، نواة الثابت تتشكل من ثقوب (أو صفائح) ويكون عليها أسلاك موصلة تتوضع في أخاديد، تتصل هذه الأسلاك فيما بينها بشكل محدد ويتكون منها لفائف الحروكة.

يغذي التيار ac إلى لفائف الثابت، وتستحث التيارات في لفائف الدوار بسبب المجال المغناطيسي الناتج عن تيارات الثابت. يكون الدوار في الآلات الحثية بشكل اسطواني ويحمل إما (1) قضبانا موصلة – ذات دائرة قصر عند النهايتين بحلقات موصلة، كما في الآلات ذات الشكل القفصي– الشكل 17.14 (أ)، أو (2) لفائف متعددة الطور، تؤخذ نهاياتها للخارج إلى حلقات منزلقة من أجل التوصيل الخارجي، كما في آلات المحرك ذات دوار اللفائف المبينة بالشكل 17.14 (ب). إن لفائف هذا الأخير مشابهة للفائف الثابت، تسمى آلات الشكل القفصي أحيانا الآلات بدون فحمات، ويصطلح على تسمية محركات دوار اللفائف بمحركات الحلقة المنزلقة.



الشكل 17.14

يعمل المحرك الحثي على مبدأ التفاعل المتبادل بين التيارات المستحثة في الدوار والمجال في الفرجة الهوائية. إذا سمح للدوار بالدوران تحت تأثير العزم الناتج عن التفاعل المذكور، تعمل الآلة كمحرك. من ناحية أخرى، يمكن دفع الدوار بعامل خارجي بسرعة عالية لدرجة تسمح للآلة بتوليد قدرة كهربائية، عندئذ تعمل الآلة كمولد حثي.

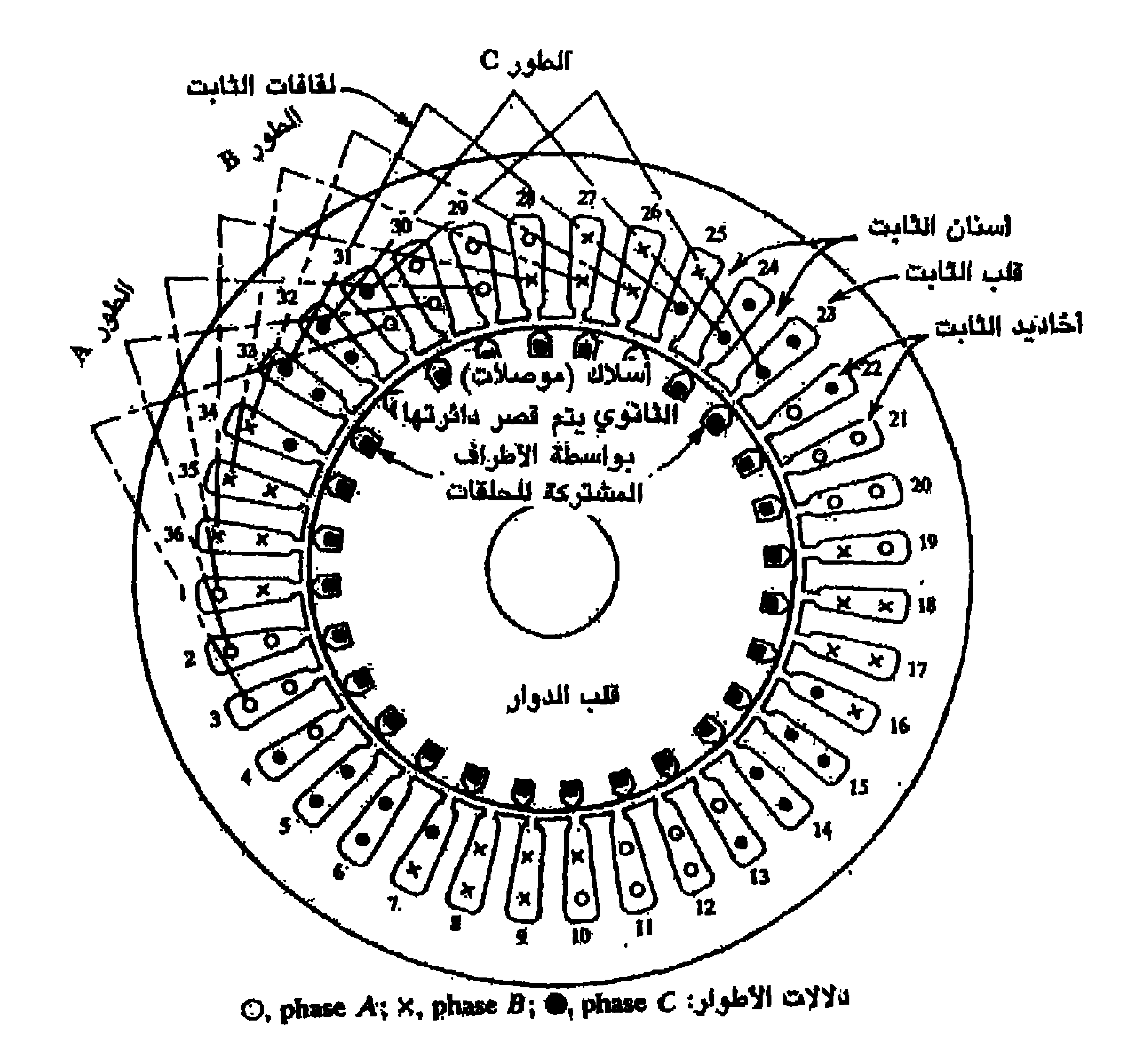
تتوزع لفائف الحروكة في المحرك الحثي ثلاثي الطور، بشكل مناسب فوق محيط الثابت، كما بالشكل 18.14 نفترض أن القوة المحركة mmf الناتجة بواسطة كل طور هي جيبية فراغية. هذه القوى mmf تكون مزاحة كل منها عن الأخرى بزاوية 120 درجة (كهربائية) في الفراغ:

$$\mathscr{F}_A = \mathscr{F}_m \sin \omega t \cos \frac{\pi x}{\tau}$$

$$\mathscr{F}_B = \mathscr{F}_m \sin (\omega t - 120^\circ) \cos \left(\frac{\pi x}{\tau} - 120^\circ\right) \qquad (19.14)$$

$$\mathscr{F}_C = \mathscr{F}_m \sin (\omega t + 120^\circ) \cos \left(\frac{\pi x}{\tau} + 120^\circ\right)$$

حيث F_m هي مواسعة كل قوة mmf في الملف ذي N لفة، وبأخذ القيم الرئيسة فقط،



الشكل 18.14

بإضافة القوى mmf الثلاثة من العلاقة (19.14) نحصل على mmf الناتجة:

$$\mathscr{F}(x, t) = 1.5\mathscr{F}_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi x}{\tau}\right) \quad (20.14)$$

يلاحظ أن F(x,t) هي موجة، ذات مواسعة قدرها $1.5F_m$، وهي تتنقل على محيط دائرة بسرعة تبلغ بالنسبة إلى الثابت:

$$vs \equiv \frac{TW}{\pi}(m/s) \quad (21.14)$$

نطلق على Vs تسمية السرعة المتزامنة. لاحظ أن طول الموجة هو:

$$\lambda = \frac{2\pi v_s}{w} = 2T(m) \qquad (22.14)$$

إذا كان للآلة p قطباً، يمكن إعادة كتابة (12.14) بالشكل:

$$ns = \text{السرعة} \quad \text{المتزامنة} = \frac{120 f_1}{p}(rpm) \qquad (23.14)$$

حيث $f_1 = w/2\pi$ هو تردد تيار الثابت (وتردد mmf الدورانية).

تصف العلاقة (20.14) المجال المغناطيسي الدوراني الناتج عن ثابت المحرك الحثي. هذا المجال يجتاز (يعترض) أسلاك الدوار، فتستحث جهود في هذه الاسلاك. هذه الجهود تسبب ظهور تيارات في الدوار، تتفاعل مع مجال الفرجة الهوائية لتسبب نشوء عزم، يستمر وجوده طيلة وجود المجال المغناطيسي الدوراني والتيارات المستحثة فيه. بالنتيجة، يبدأ المحرك بالدوران بسعة $n<n_s$ باتجاه المجال الدوراني.

الانزلاق slip، الدوائر المكافئة للآلة:

تتعلق السرعة الفعلية n للدوار بالسرعة المتزامنة n_s وفق الانزلاق (أو نسبة التفاوت s):

$$s \equiv \frac{n_s - n}{n_s} \qquad (24.14)$$

أو الانزلاق المئوي 100s

في حالة السكون (s=1)، يكون للمجال المغناطيسي الدوراني الناتج عن الثابت نفس السرعة بالنسبة للفائف الدوار كما بالنسبة للفائف الثابت. فتردد

تيارات الدوار f_2 هو نفس تردد تيارات الثابت f_1. عند السرعة المتزامنة ($s=0$) لا توجد سرعة نسبية بين المجال الدوراني والدوار، ويكون تردد تيار الدوار صفرا. (في الحقيقة، التيار يكون صفرا). عند قيم متوسطة للسرعة، يكون تردد تيار الدوار متناسباً مع الانزلاق.

$$f_2 = sf_1 \qquad (25.14)$$

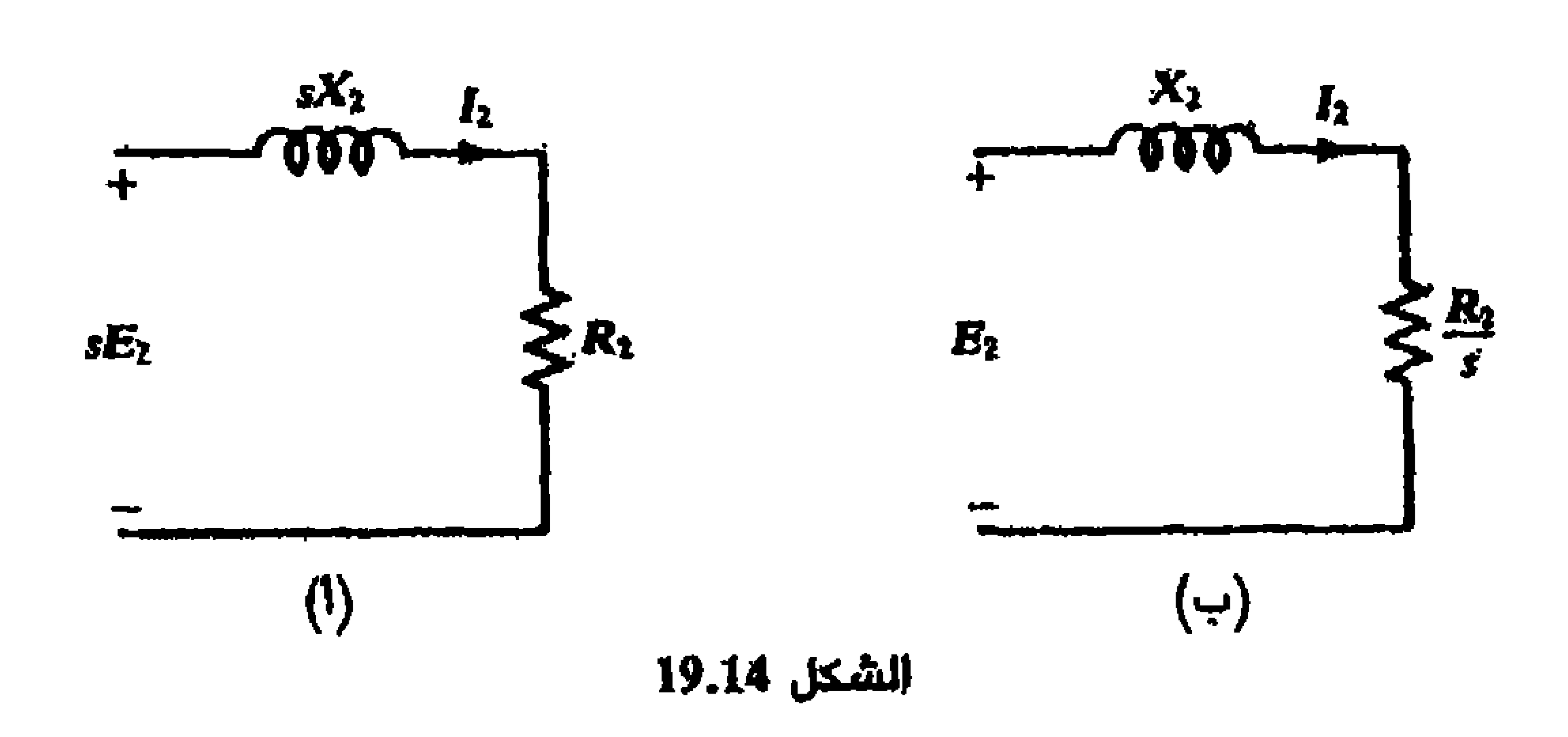
ومن هنا جاءت تسمية f_2 بتردد الانزلاق. بملاحظة أن تردد تيارات الدوار هو تردد الانزلاق، نحصل على الدائرة المكافئة للدوار (على أساس من كل طور) كما بالشكل 19.14 (أ). والتي تعطي تيار الدوار 2 بالشكل:

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}}$$

وفيها E_2 هي القوة emf المستحثة في الدوار عند حالة السكون، X_2 هي مفاعلة تسرب الدوار لكل طور عند السكون، و$R2$ مقاومة الدوار لكل طور. يمكن كتابة العلاقة أيضاً بالشكل:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_2^2}} \qquad (26.14)$$

نعيد رسم دائرة الشكل 19.14 (أ) من اجل العلاقة (26.14) حسب الشكل 19.14 (ب):

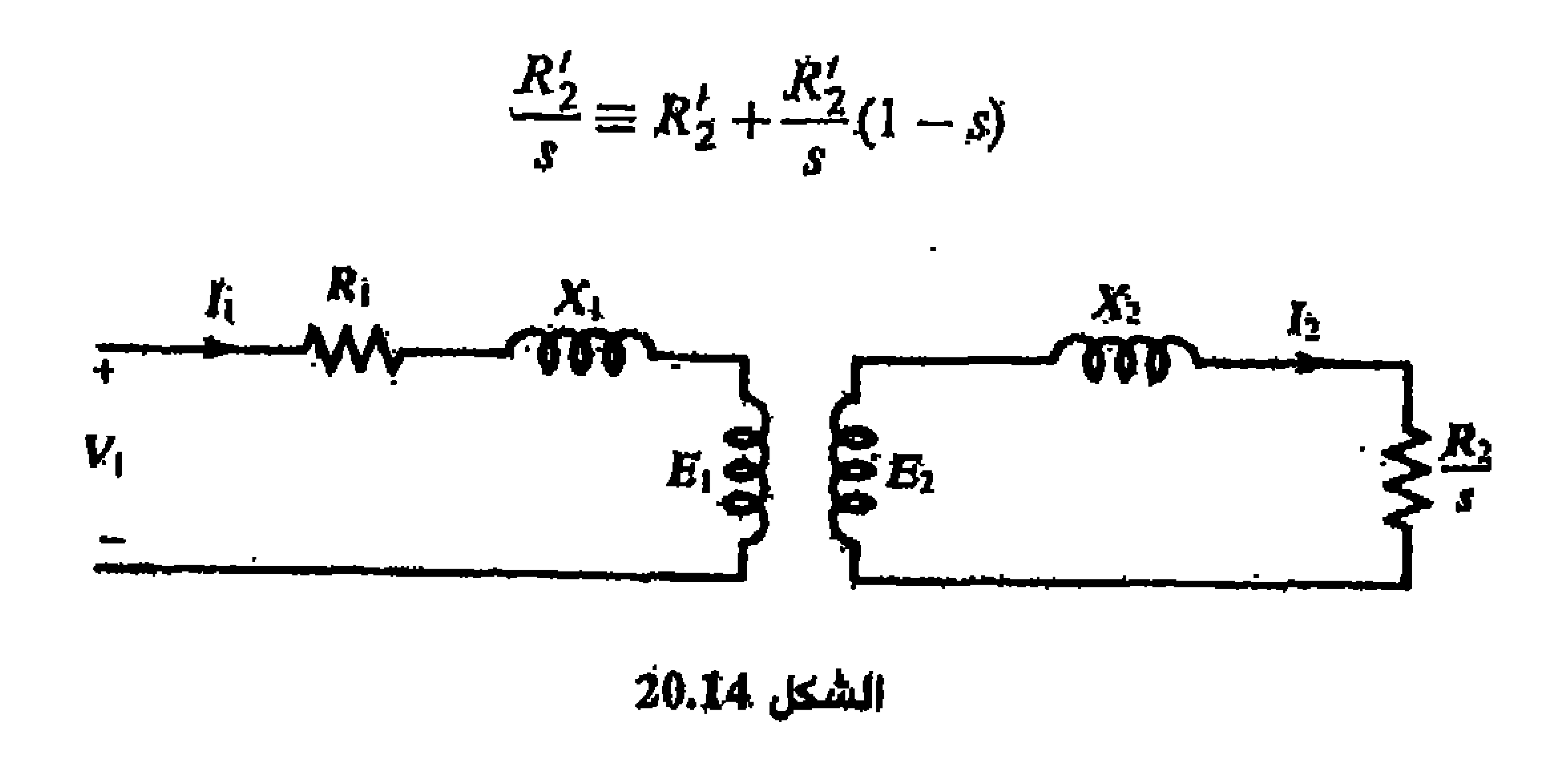


الشكل 19.14

لإدخال دائرة الثابت بالاعتبار، يمكن النظر إلى المحرك الحثي كمحول له فرجة هوائية، وله مقاومة متغيرة في ملفه الثانوي. فالأولي في المحول يقابل الثابت من المحرك الحثي، بينما يكون الثانوي مقابلاً للدوار، على أساس ثلاثي الطور. بسبب وجود الفرجة الهوائية، تميل مفاعلة التمغنط إلى قيمة منخفضة مقارنة مع مفاعل المحول الحقيقي. كما هو الحال في المحول. لدينا تدفق متبادل يقرن كلاً من الثابت والدوار، يمثل بمفاعلة كل من التمغنط ومختلف قيم تدفق التسرب. مثلاً يرمز إلى تدفق التسرب الكلي للدوار X_2 في الشكل 19.14 (ب).

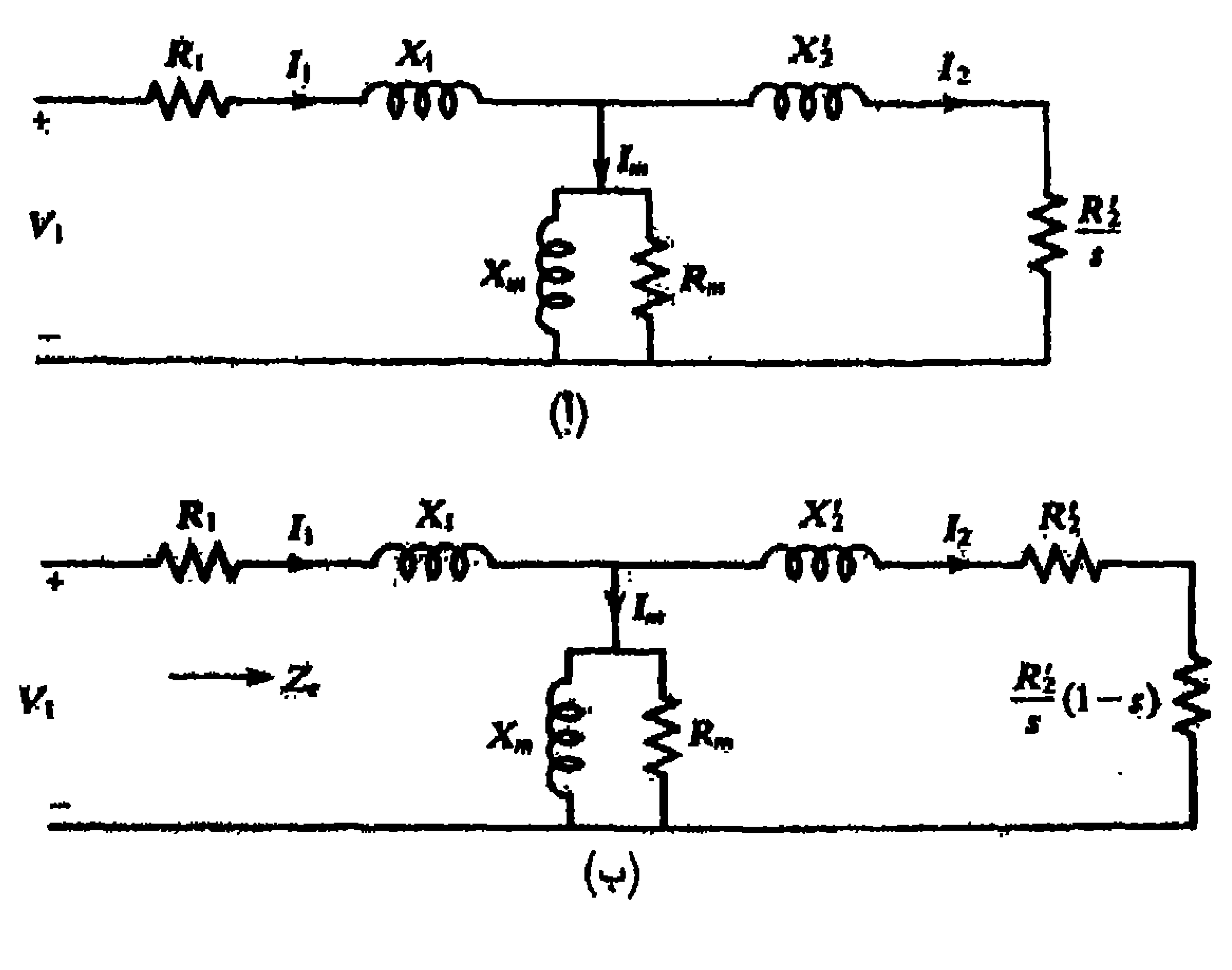
بالأخذ بعين الاعتبار، الدوار الذي سيرتبط مع الثابت كما يرتبط ثانوي المحول مع الأولي له، يمكن رسم الدائرة المبينة بالشكل 20.14 لتطوير هذه الدائرة، تعبر عن كميات الدوار منسوبة إلى الثابت (كما في حالة المحول) فنحصل على الدائرة المكافئة تماماً (لكل طور) الموضحة بالشكل 21.14 (أ) لأسباب سوف تتضح لاحقاً نقسم R'_2/s إلى قسمين:

$$\frac{R'_2}{s} \equiv R'_2 + \frac{R'_2}{s}(1-s)$$



الشكل 20.14

فتحصل على الدائرة في الشكل 21.14 (ب) R'_2 هي هنا، ببساطة، مقاومة الدوار لطور واحد بحالة السكون منسوبة إلى الثابت و$R'_2(1-s)/s$ هي المقاومة الديناميكية – لكل طور – التي تعتمد على سرعة الدوار وتتعلق بالحمل على المحرك. لاحظ أن جميع قيم البارامترات في الشكل 21.14 هي قيم حالة السكون.



الشكل 21.14

الحسابات على الدوائر المكافئة:

إن الفائدة العظمى التي تكسبها من دائرة مكافئة لمحرك حثي هي حساب الأداء له. تتم جميع الحسابات على أساس طور واحد، مفترضين عملاً متوازنا للآلة. ثم نحصل على الكميات الكلية باستخدام عامل الضرب المناسب.

ينتج الشكل 22.14 (أ) من الشكل 22.14 (ب) بعد حذف المقاومة R_m. (لن يتم أخذ ضياعات النواة بعين الاعتبار وهي في معظمها تكون في الثابت — إلا عند حساب المردود) يظهر على الشكل 22.14 (ب) — بشكل تقريبي — سريان القدرة، ومختلف ضياعات القدرة في طور واحد للآلة. وفيه:

P_i ≡ قدرة الدخل.

P_g ≡ القدرة التي تجتاز الفرجة الهوائية

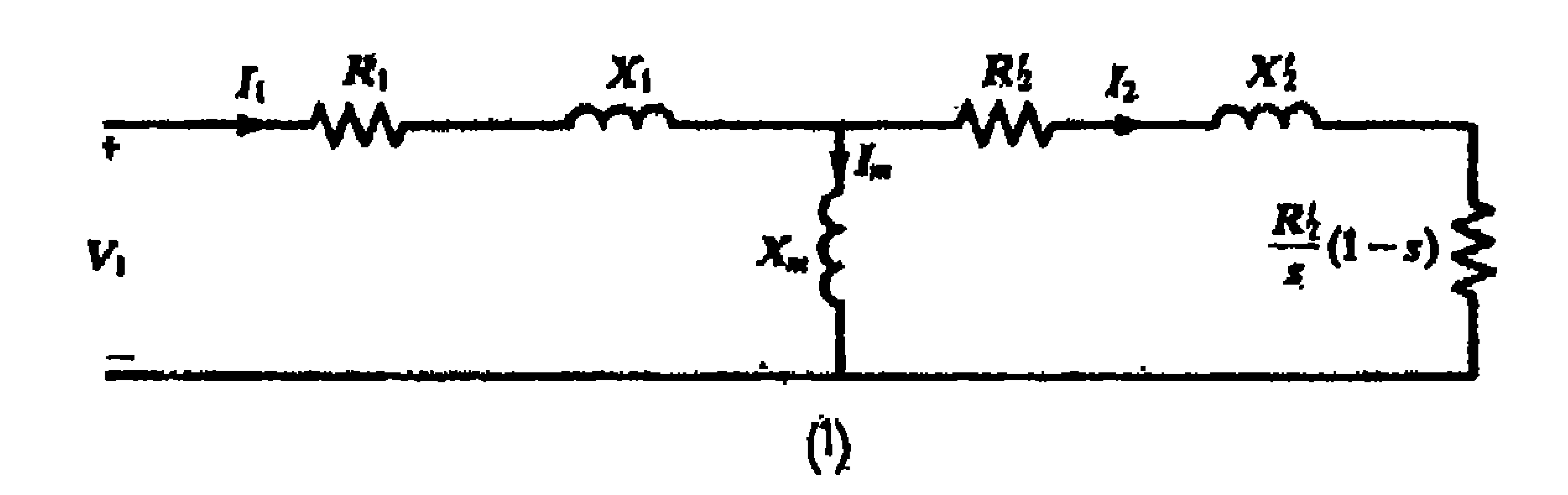
P_d ≡ القدرة الكهرطيسية الناتجة

$\equiv$ القدرة في الحمل $R'_2(1-s)/s$

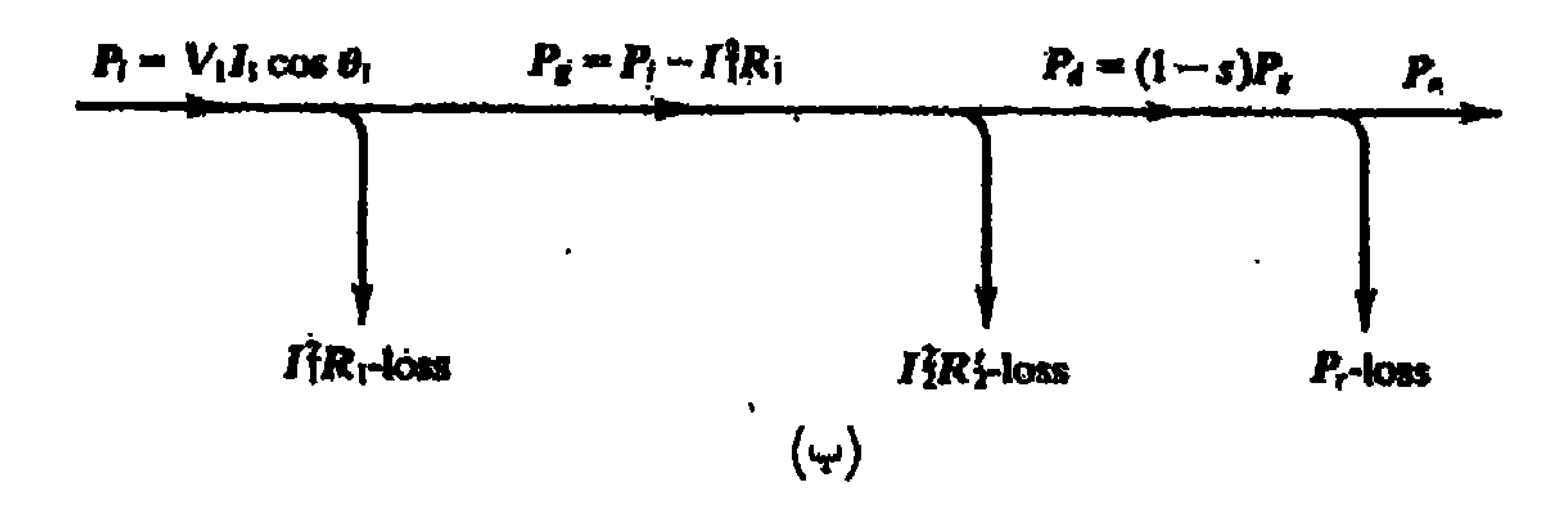
P_r $\equiv$ ضياع الدوران (الميكانيكي)

P_o $\equiv$ قدرة خرج محور الدوران

مردود المحرك هو $\eta \equiv P_o/Pi$



(أ)



(ب)

الشكل 22.14

الآلات التزامنية:

يطلق اسم الآلات التزامنية على الآلات التي تعمل بسرعات ثابتة وترددات ثابتة تحت حالة مستقرة. وكما هو لحال في معظم الآلات الدوارة، يمكن أن تعمل الآلة المتزامنة إما كمحرك أو كمولد. يعتمد عمل المولد المتزامن على قانون فارادي في الحث الكهرطيسين ويشبه عمل مولد متزامن إلى حد بعيد عمل مولد على التيار dc، والذي فيه يتم توليد القوة emf بواسطة الحركة النسبية بين

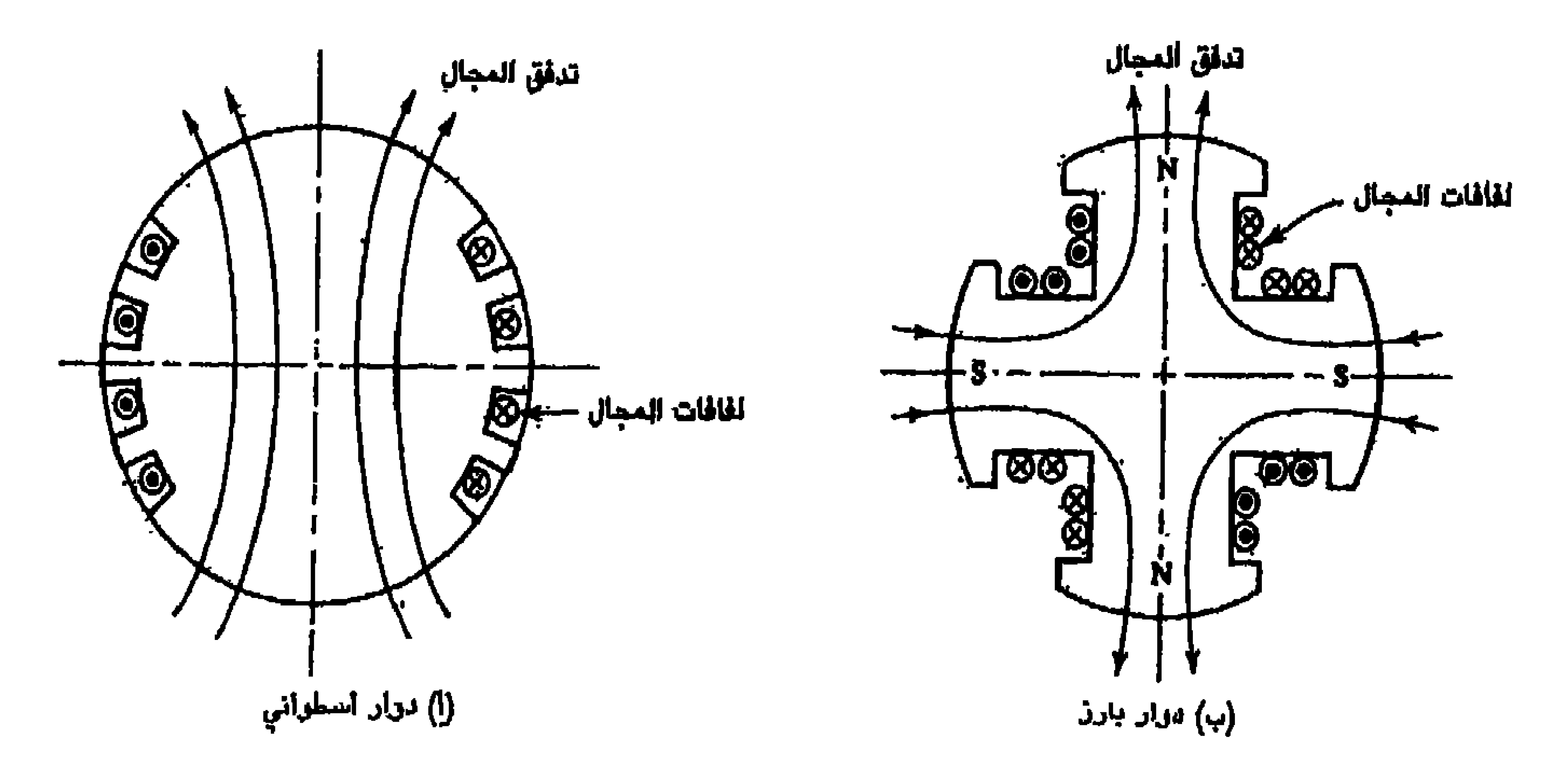
الأسلاك (الموصلات) والتدفق المغناطيسي. إلا أنه لا يوجد للمولد المتزامن موزع كما في مولد التيار dc المبين بالشكل 8.14 إن القسمين الرئيسين في الآلة المتزامنة هما بنية المجال التي تحمل اللفافة المستحثة بالتيار dc، والحروكة التي يكون لها غالباً لفافة ثلاثية الطور وهي التي تتولد فيها قوة emf متاوية. تحتوي معظم الآلات المتزامنة الحديثة تقريباً على حروكة ثابتة وبنية دورانية. تتصل لفافة التيار dc الموجودة على المجال الدوراني مع مصدر خارجي عبر حلقات منزلقة وفحمات. أو يمكن أن تستقبل إثارة بدون فحمات ناتجة عن ثنائيات دورانية. في بعض الحالات يكون الثابت الذي يحمل لفائف الحروكة مشابها للثابت في المحرك الحثي متعدد الأطوار بالإضافة للفائف المجال والحروكة، تحتوي الآلة التزامنية على قضبان تخميد متوضعة على الدوار، تلعب هذه القضبان دورها خلال مراحل الإقلاع والمراحل الإنتقالية.

اعتماداً على تركيب الدوار، يمكن للآلة المتزامنة أن تكون من نموذج الدوار الاسطواني – الشكل23.14 (أ) أو من نموذج القطب البارز – الشكل 23.14 (ب) (لاحظ أن الحروكة غير ظاهرة في الشكلين 22.14، 23.14) النموذج الأول يستخدم في الآلات عالية السرعة كما في المولدات التوربينية، بينما يستخدم النموذج الثاني عند السرعات المنخفضة كما في المولدات ذات العجلة المائية.

عمل المولد والمحرك، معادلة القوة emf:

لفهم عمل المولد نعود أولاً إلى الآلة قمن نموذج الدوار الأسطواني ثلاثية الطور. الشكل 24.14، التي لها لفافة مكثفة. ينتج عن العلاقة (6.14) أن الجهد المستحث في الطور A يعطي بالعلاقة:

$$v_A = V_m \sin wt$$

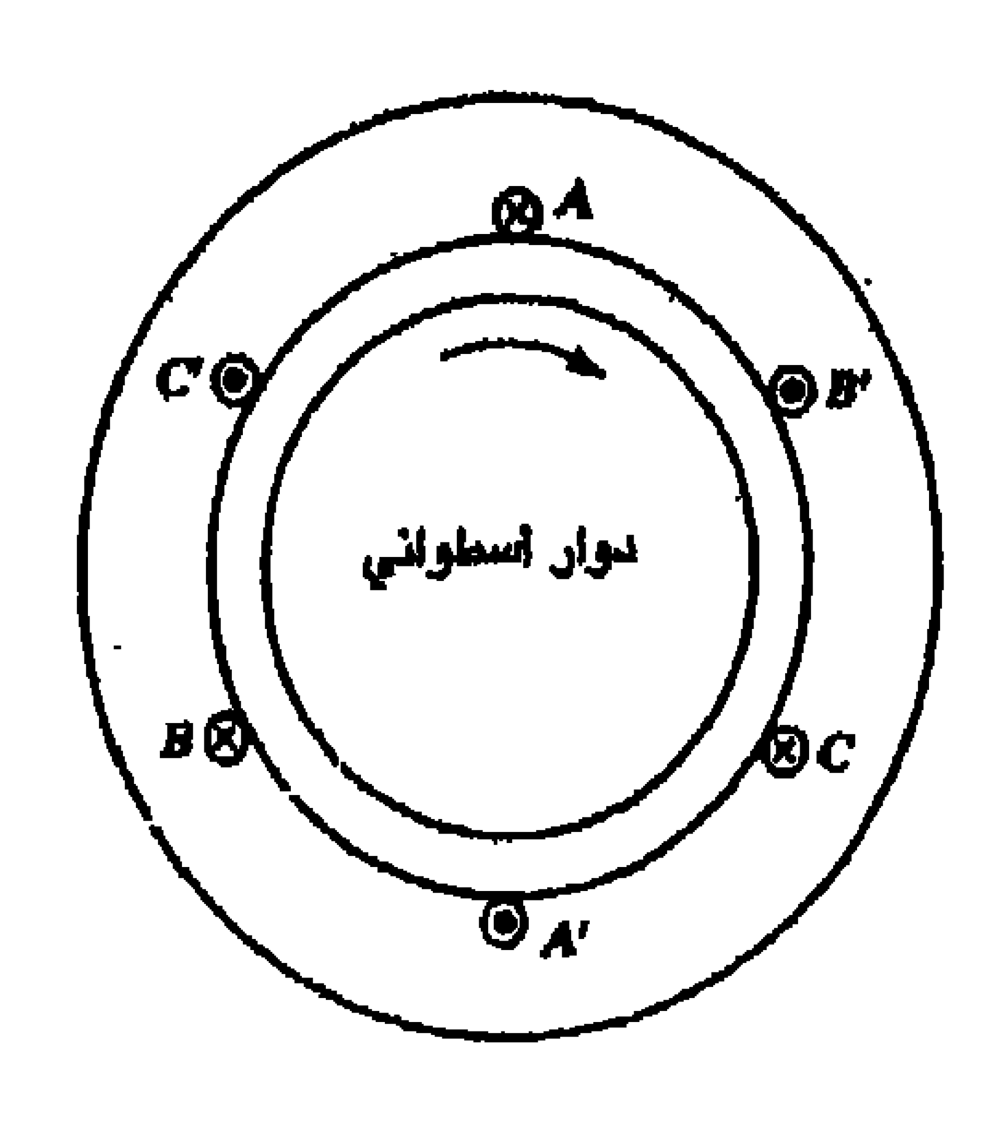


الشكل 23.14

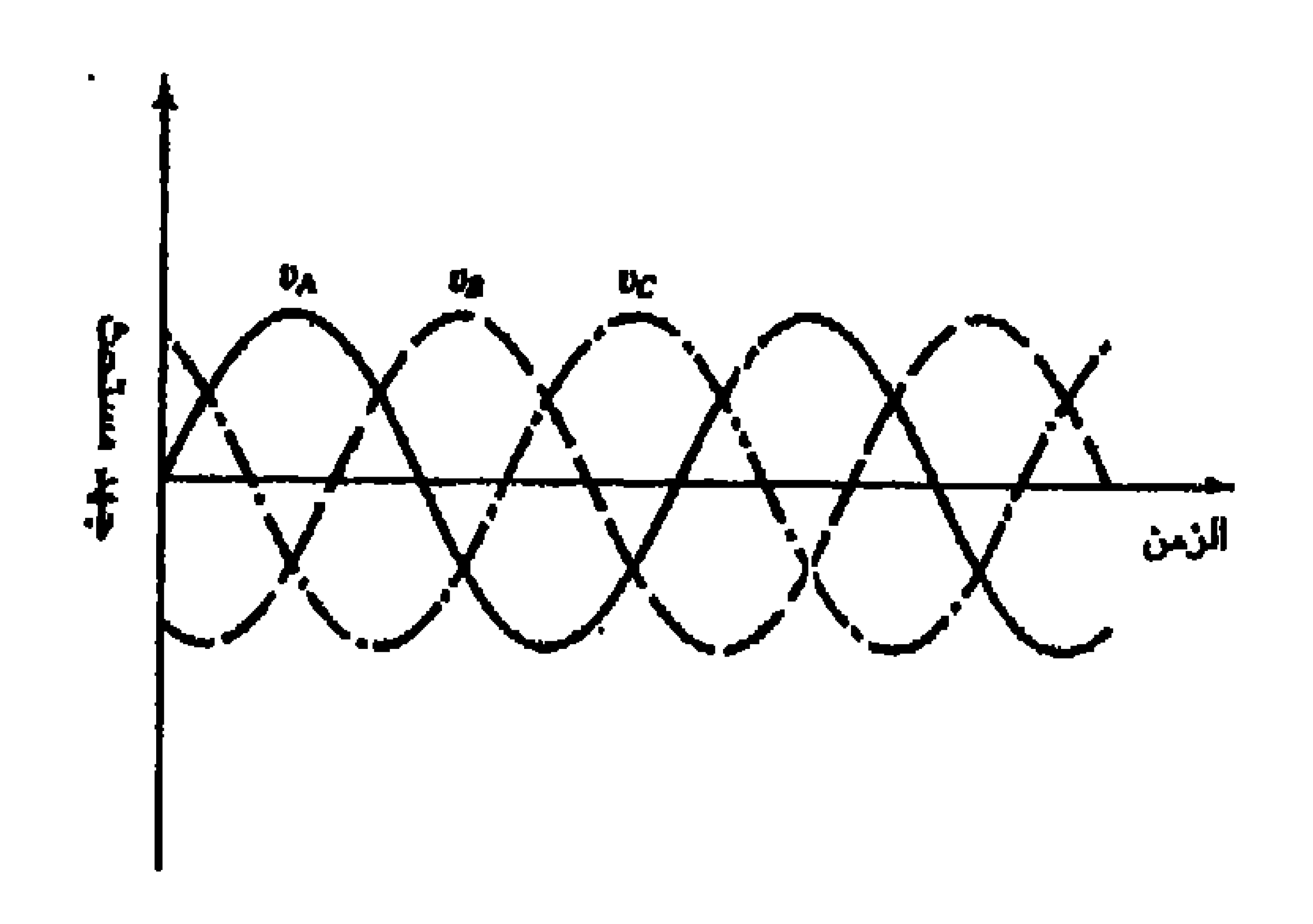
حيث W هي السرعة الزاوية للدوار، الطوران B وC مزاحان عن A وكل منهما عن الأخر بزاوية 120 درجة، ويستحث عنهما الجهدان:

$$v_C = V_m \sin(wt + 120^o) \qquad v_B = V_m \sin(wt - 120^o)$$

هذان الجهدان مرسومان على الشكل 25.14 وبالتالي تردد الجهد ثلاثي الطور المتولد $f = w/2\pi(Hz)$



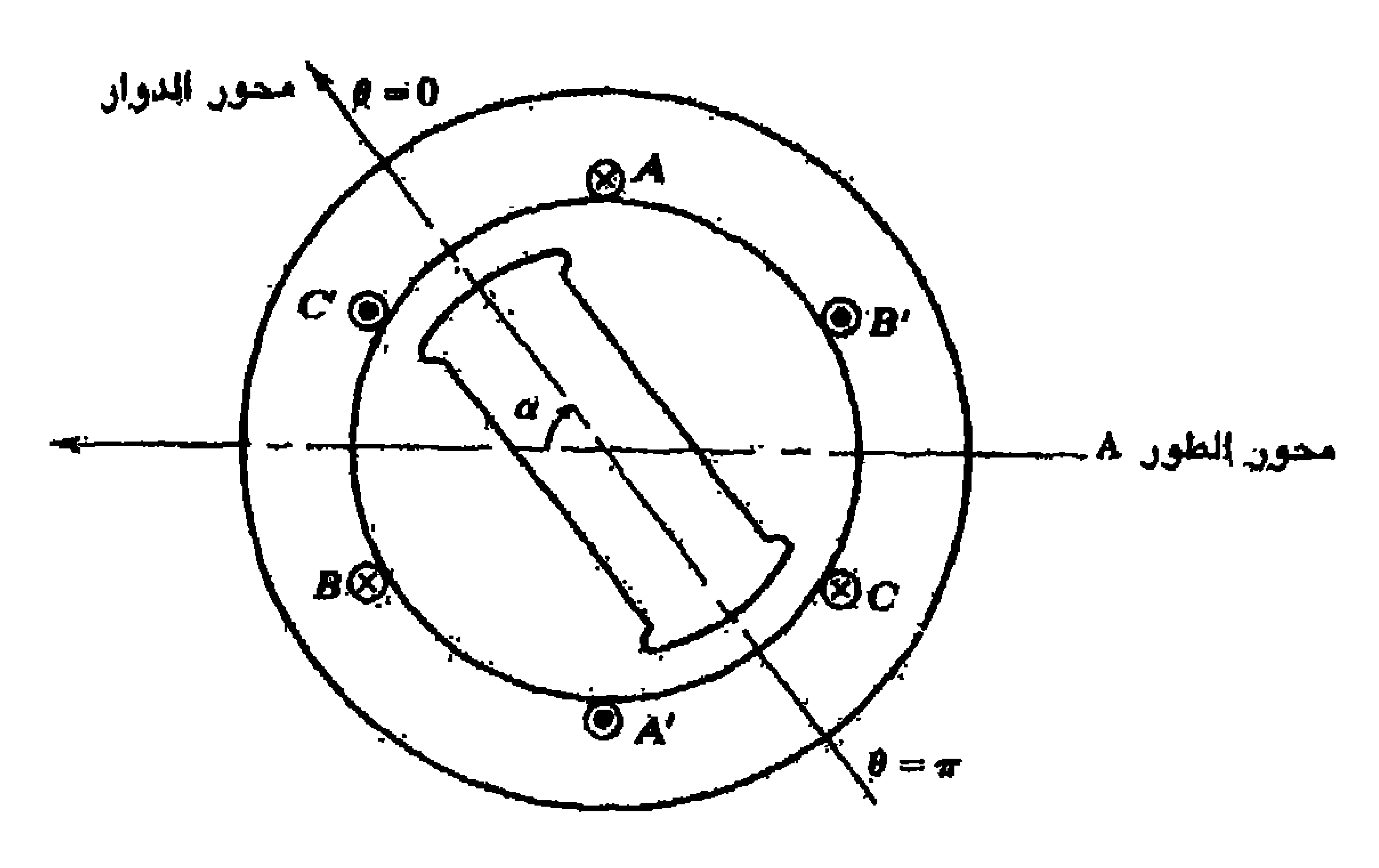
الشكل 24.14. آلة متزامنة ثلاثية الطور ذات دوار أسطواني



الشكل 25.14

بعدئذ، لنأخذ المولد ذا القطب البارز المبين في الشكل 26.14، وفيه ينتج عن لفافة مجال التيار dc كثافة تدفق يعطي توزعها بالعلاقة.

$$B(\theta) = B_m \cos\theta$$



الشكل 26.14. آلة متزامنة ثلاثية الطور ذات قطب بارز

حيث تقاس θ بالنسبة لمحور الدوار كما بالشكل 26.14 ليكن ملف الحروكة ذو N لفة الموافق للطور وله نصف القطر r وطول المحور ℓ، عندئذ إذا كان الدوار بالوضع الزاوي $\alpha = wt$ (راجع الشكل 26.14) يكون التدفق الكلي الذي يقرن الملف معطى بالعلاقة

$$\lambda = N\int_{(\pi/2)-\alpha}^{(3\pi/2)-\alpha} B(\theta)\ell r\,d\theta = -2NB_m\ell r\cos\alpha$$

وهكذا، ومن قانون فارادي، يعطي الجهد المستحث في الملف بالعلاقة:

$$v_A = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\lambda}{d\alpha}\frac{d\alpha}{dt} = V_m \sin\omega t \qquad (27.14)$$

حيث $V_m = 2NB_m \ell rw$ ؛ يمكن إيجاد العلاقات المشابهة لكل من الطورين B وC. لقد تبين أن كلا من نموذجي المولدات ذي الدوار الأسطواني وذي القطب البارز يخضع للعلاقة (27.14).

لاحظ أن ملفات الحروكة ثلاثة الطور (أي الثابت) ستؤدي لإنتاج مجال مغناطيسي دوراني في الفرجة الهوائية، كما هو الحال في المحرك الحثي ثلاثي الطور. تعطي سرعة دوران المجال، أي السرعة المتزامنة n_s بالعلاقة.

$$n_s = \frac{120f}{p}(rpm) \qquad (28.14)$$

حيث P هي عدد الأقطاب، f هي تردد الجهد المطبق على الحروكة. إلا أن المحرك، عند عدم قصر دائرة الأسلاك في الدوار، لن يدور من تلقاء نفسه، أفرض أنه تم إيصال الدوار في الآلة ذات القطب البارز إلى سرعة قريبة من n_s (بواسطة خارجية ما)، عندئذ، وحتى في حالة عدم وجود إثارة مجالية في الدوار، سنتظم الدوار ويدور مع المجال الدوراني للثابت، بسبب عزم المقاصرة.

من الواضح عدم وجود عزم المقاصرة في الآلة ذات الدوار الاسطواني الموضح بالشكل 24.14. في جمع الحالات، ومن أجل اي نوع من الآلات التي تدور بسرعة قريبة من السرعة المتزامنة، إذا تمت إثارة لفافة مجال الدوار في اللحظة الزمنية الموافقة لوضع القطب الشمالي لمجال الدوار مقابل القطب الجنوبي لمجال ثابت، عندئذ سوف يقفل المجالان وسوف يدور الدوار بالسرعة المتزامنة.

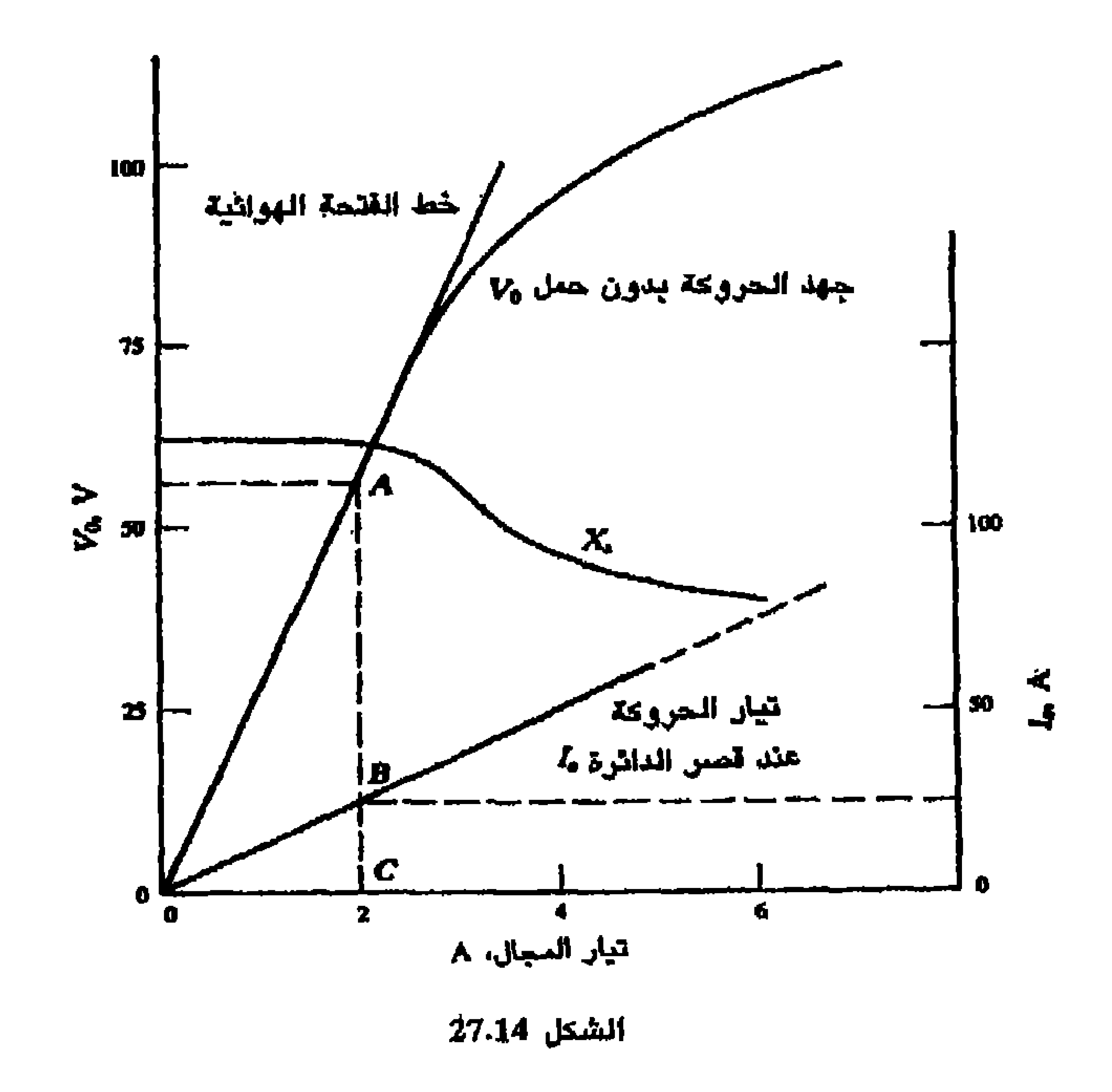
بغية جعل المحرك المتزامن يقلع من ذاته، يزود بقضبان تخميد، تقوم كما في قفص المحرك الحثي، بتقديم عزم للإقلاع. بمجرد سحب الدوار ليصبح على توافق مع مجال الثابت الدوراني ودورانه بالسرعة التزامنية، ينتهي دور وعمل قضبان التخميد. أي ابتعاد عن سرعة التزامن يؤدي إلى حصول تيارات مستحثة في قضبان التخميد، التي تميل إلى العودة إلى سرعة التزامن.

مميزات المولد: عند اللاحمل، والدائرة المقصورة، وتنظيم الجهد

إن مميزة الجهد بدون حمل، أو بدائرة مفتوحة، لمولد متزامن مماثلة لميزة مولد تيار مستمر. يظهر لنا الشكل 27.14، مميزة كهذه، مع أخذ أثر الإشباع المغناطيسي بالحسبان. والآن، إذا تم قصر دائرة أقطاب المولد، ينخفض الجهد المستحث، داخلياً، ضمن المولد. يتم استنتاج مميزة تيار دائرة القصر، المبينة أيضاً في الشكل 27.14 من العلاقة الطورية (على أساس كل طور لوحدة):

$$V_0=I_aZ_s=I_a(R_a+jX_s) \qquad (29.14)$$

في هذه العلاقة (29.14) يمثل V_0 جهد الحروكة بدون حمل عند تيار محدد للمجال، وتيار الدائرة المقصورة للحروكة I_a عند نفس التيار المحدد للمجال. تعرف المعاوقة Z_s باسم المعاوقة المتزامنة، وR_a مقاومة الحروكة، وتعرف X_s بأنها المفاعلة المتزامنة. يمكن قياس هذه الأخيرة لمولد الدوائر الأسطواني مباشرة، لأنها مستقلة عن وضعية الدوار في هذا النوع من الآلات. في مولدات القطب الناتيء، من ناحية ثانية، تعتمد المفاعلة المتزامنة على وضعية الدوار.



الشكل 27.14

في معظم الآلات المتزامنة، لدينا $X_s >> R_a$، بحيث، حسب الشكل 27.14:

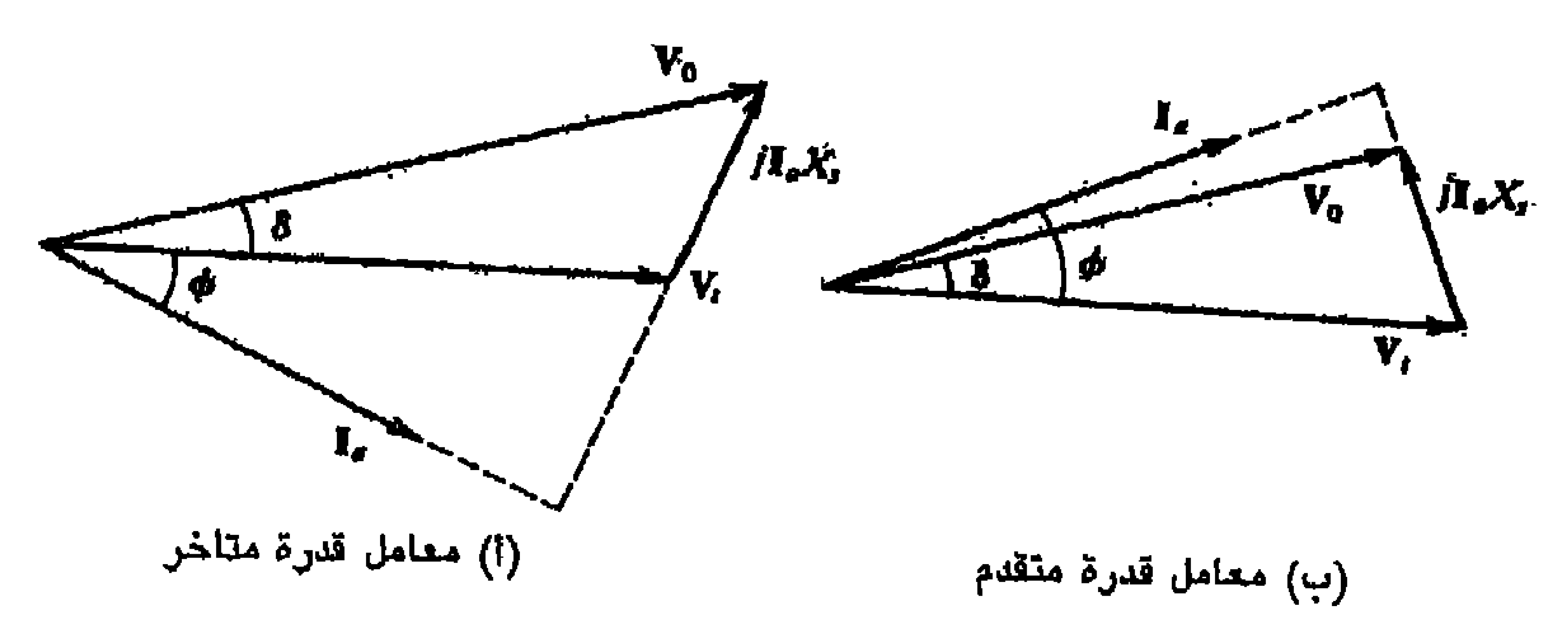
$$X_s \approx Z_s = \overline{AC} / \overline{BC}$$

وهكذا، تتغير قيمة X_s مع تغير تيار المجال، كما يدل عليه المنحني المتناقص (بسبب الإشباع) في الشكل 27.14 ومع ذلك، وفي معظم الحسابات، وسوف نستخدم القيمة الخطية (الثابتة) من اجل X_s. كما في حالة محول أو مولد تيار مستمر، نعرف منظم الجهد لمولد متزامن عند حمل معطى بالعلاقة:

$$\text{النسبة المئوية لتنظيم الجهد} \equiv \frac{V_0 - V_t}{V_t} x\ 100\% \qquad (30.14).$$

حيث V هو جهد القطب لكل طور مع الحمل، وV_0 هو جهد القطب لكل طور بدون حمل. بمعرفة X_s (لمولد الدوار الاسطواني) وV_t يمكننا إيجاد V_0 من (29.14) وبالتالي تحديد تنظيم الجهد.

خلافاً لما تم في مولد التيار dc يمكن أن يصبح تنظيم الجهد لمولد متزامن صفراً، أو حتى أن يأخذ قيما سالبة، حسب معامل القدرة والحمل. بإهمال مقاومة الحروكة، نبين المخططات الطورية في حالتي معامل قدرة متأخر ومتقدم، على الشكل 28.14.



الشكل 28.14

مميزة زاوية القدرة لآلة ذات دوار اسطواني:

بالرجوع إلى الشكل 28.14، Φ هي زاوية معامل القدرة، δ هي الزاوية التي بها يتقدم V_0 على V_t وتعرف بأنها زاوية القدرة كتعليل لهذه التسمية، نحصل من الشكل 28.14 على:

$$I_a X_s \cos\phi = V_0 \sin\delta \tag{31.14}$$

حيث افترضنا أن $\delta>0$ (فعل المولد). ولكن القدرة الناتجة (لكل طور) من قبل المولد، هي القدرة المقدمة إلى الحمل، إذن:

$$P_d = V_t I_a \cos\phi \quad \text{(للمولد)} \tag{32.14}$$

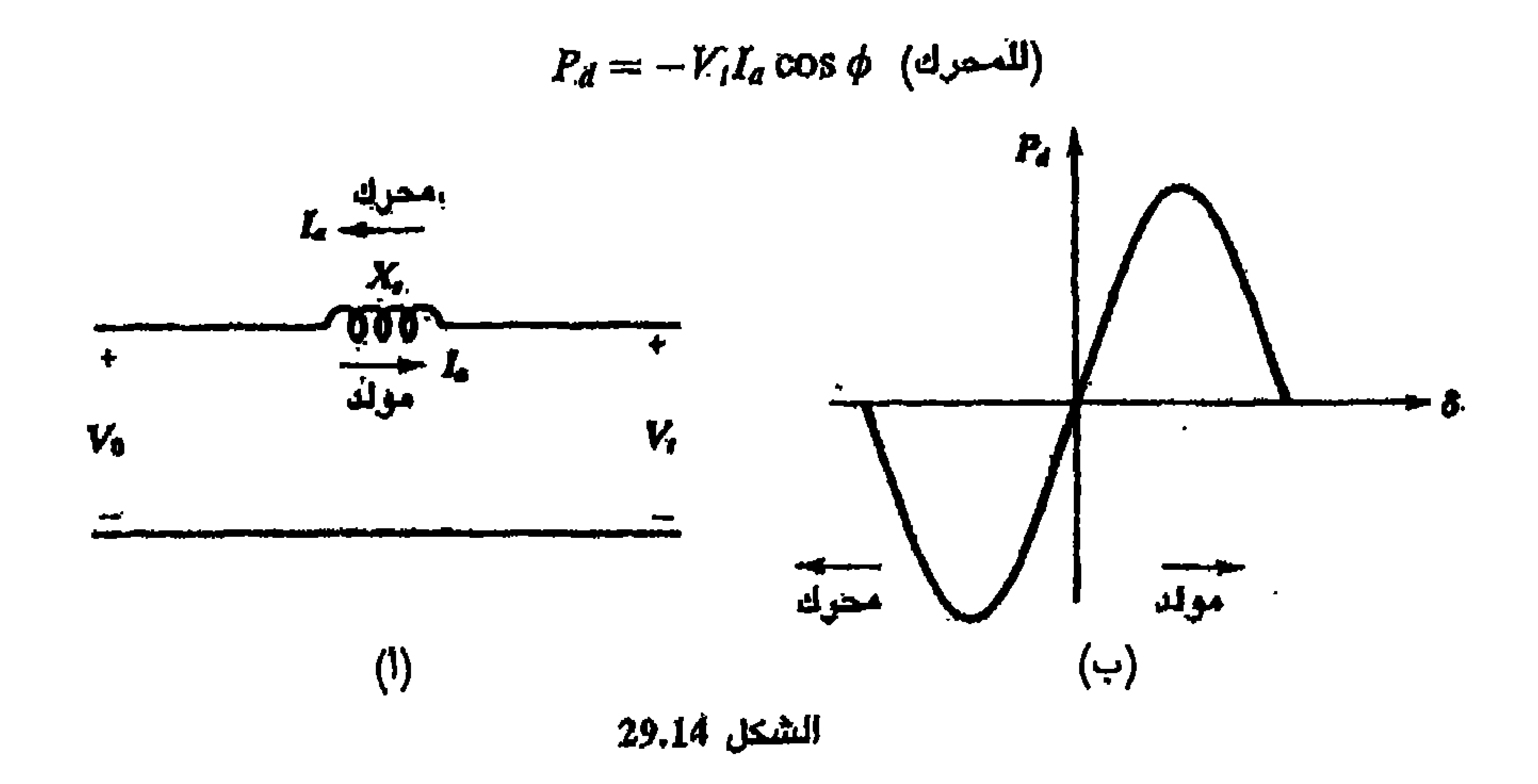
بمقارنة (31.14) مع (32.14) نحصل على:

$$P_d = \frac{V_0 V_t}{X_s} \sin\delta \tag{33.14}$$

والتي تبين أن القدرة المقدمة من المولد تتناسب مع $\sin\delta$

كما يشير إليه الشكل (29.14) (أ)، إن المحرك ذا الدوار الاسطواني يستهلك، لكل طور، عند إهمال مقاومة الحروكة، قدرة كهربائية قدرها $V_t I_a \cos\Phi$. من هنا نستطيع تعريف القدرة الناتجة عن المحرك، بالشكل:

$$P_d = -V_t I_a \cos\phi \quad (\text{للمحرك})$$



الشكل 29.14

وفق هذا المفهوم، تصلح (33.14) أيضاً للمحرك ذي الدوار الاسطواني. حيث الآن قيمة δ، وبالتالي قيمة جيب $\sin\delta$ تكون سالبة (V_t يتقدم على V_0) باختصار، العلاقة (33.14) هي مميزة زاوية القدرة لآلة متزامنة ذات دوار اسطواني. يوجد مخطط على الشكل 29.14 (ب) في حالة المحرك يعطي الشكل 29.14 (أ) ما يلي:

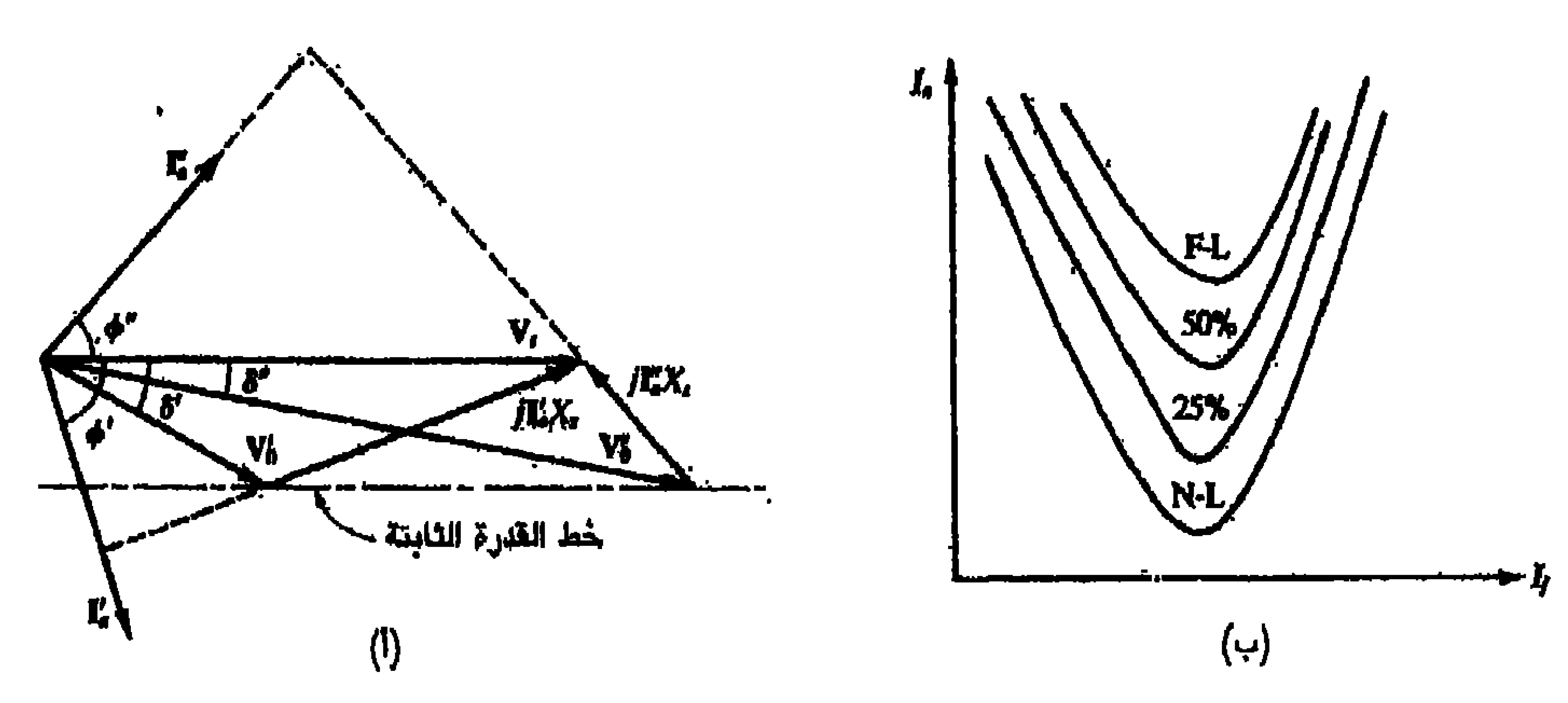
$$V_t = V_o + jI_a X_s \tag{34.14}$$

إذا كان المحرك يعمل بقدرة ثابتة، عندئذ تقتضي العلاقتان (31.14) و(33.14) أن يكون،من أجل جهد معين على القطبين:

$$\text{ثابت} = I_a X_s \cos\phi = V_o \sin\delta \tag{35.14}$$

الآن، تعتمد V_0 على تيار المجال I_f. لنأخذ بالحسبان حالتين: (1) تضبط قيمة I_f بحيث $V_0<V_t$ (الآلة بحالة ما قبل الإثارة)، (2) يزداد I_f حتى يصبح $V_0>V_t$ (والدائرة بحالة ما بعد الإثارة) يبين الشكل 30.41 (أ) العلاقة الطورية للفولط – أمبير في الحالتين. في الشكل وجود الفتحة (الشرطة) على الحرف تعني أن المتغير يعود لما قبل الإثارة؛ والفتحتان، للمتغير من أجل ما بعد الإثارة. عند ثبات

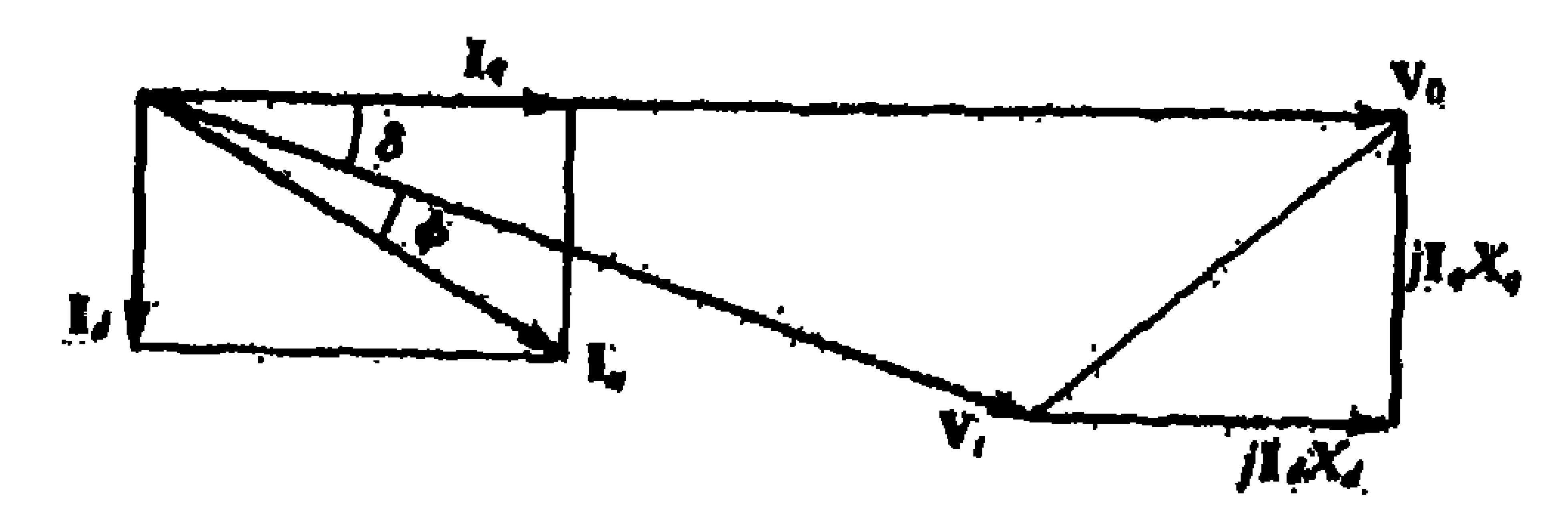
القدرة، تكون δ أقل سلبية من أجل $V_o>V_t$ مما هي عليه من أجل $V_o<V_t$ طبقاً للعلاقة (35.14) لاحظ أن المحرك في حالة ما قبل الإثارة يعمل بمعامل قدرة متأخر (I_a يتأخر عن V_t) بينما يعمل المحرك في حالة ما بعد الإثارة بمعامل قدرة متقدم. وهكذا، يتم التحكم في معامل قدرة التشغيل لمحرك بواسطة تغيير إثارة المجال (وبالتالي بتغيير V_o). وهي خاصية هامة للمحركات المتزامنة. المحل الهندسي لتيار الحروكة عند حمل ثابت حسب العلاقة (35.14) من أجل تيار مجال متغير، موضح على الشكل 30.14 (أ) ومن ذلك يمكن أن نحصل على تغيرات تيار الحروكة I_a، مع تغير تيار المجال I_f (الموافق لـ V_o) يبين الشكل 30.14 (ب) نتائج عدد من الحمولات المختلفة. تعرفُ هذه المنحنيات بالمنحنيات ذات الشكل V (منحنيات في) للمحرك المتزامن. أحد تطبيقات المحرك المتزامن هو تصحيح معامل القدرة.



الشكل 30.14. عمل محرك ذي دوار أسطواني عند قدرة ثابتة

الآلات التزامنية ذات القطب الناتيء:

من أجل هذه الآلات، نُعرف المحاثة ذات المحور المباشرة L_d والمحاثة ذات المحور التربيعي L_q وذلك حسب قيم المحاثة عندما يكون محوراً الثابت والدوار متحاذيين أو غير متحاذيين. وبالمثل، ندخل أيضاً المفاعلتين التزامنيتين X_d ذات المحور d وX_q ذات المحور q.



الشكل 31.14. مخطط طوري لمولد ذي قطب بارز

وهكذا نرسم المخطط الطوري، في حالة عمل المولد، كما بالشكل 13.14.
لاحظ أن I_a قد تحلل إلى مركبتين على المحورين I_d وI_q الوهميين أي I_d وI_q من هذا المخطط نحصل على:

$$I_q = I_a \cos(\delta + \phi) \qquad I_d = I_a \sin(\delta + \phi) \tag{36.14}$$

$$V_t \sin\delta = I_q X_q = I_a X_q \cos(\delta + \phi) \tag{37.14}$$

نشر (37.14) يعطي:

$$\tan\delta = \frac{I_a X_q \cos\phi}{V_t + I_a X_q \sin\phi} \tag{38.14}$$

بمعرفة δ (بدلالة Φ) يمكن حساب تنظيم الجهد من:

$$V_o = V_t \cos\delta + I_d X_d$$

$$\text{التنظيم النسبي المئوي} = \frac{V_o - V_t}{V_t} \, x \, 100\%$$

في الحقيقة، يصف المخطط الطوري المميزات الكاملة لأداء الآلة.

مثال:

يمكن استخدام 13.14 لاستخلاص مميزات زاوية القدرة للمولد ذي القطب الناتئ، إذا كانت مقاومة الحروكة مهملة، يمكن تطبيق (32.14). الآن،

من الشكل 31.14 مسقط I_a على V_t هو:

$$\frac{P_d}{V_t} = I_a \cos\phi = I_q \cos\delta + I_d \sin\delta \qquad (39.14)$$

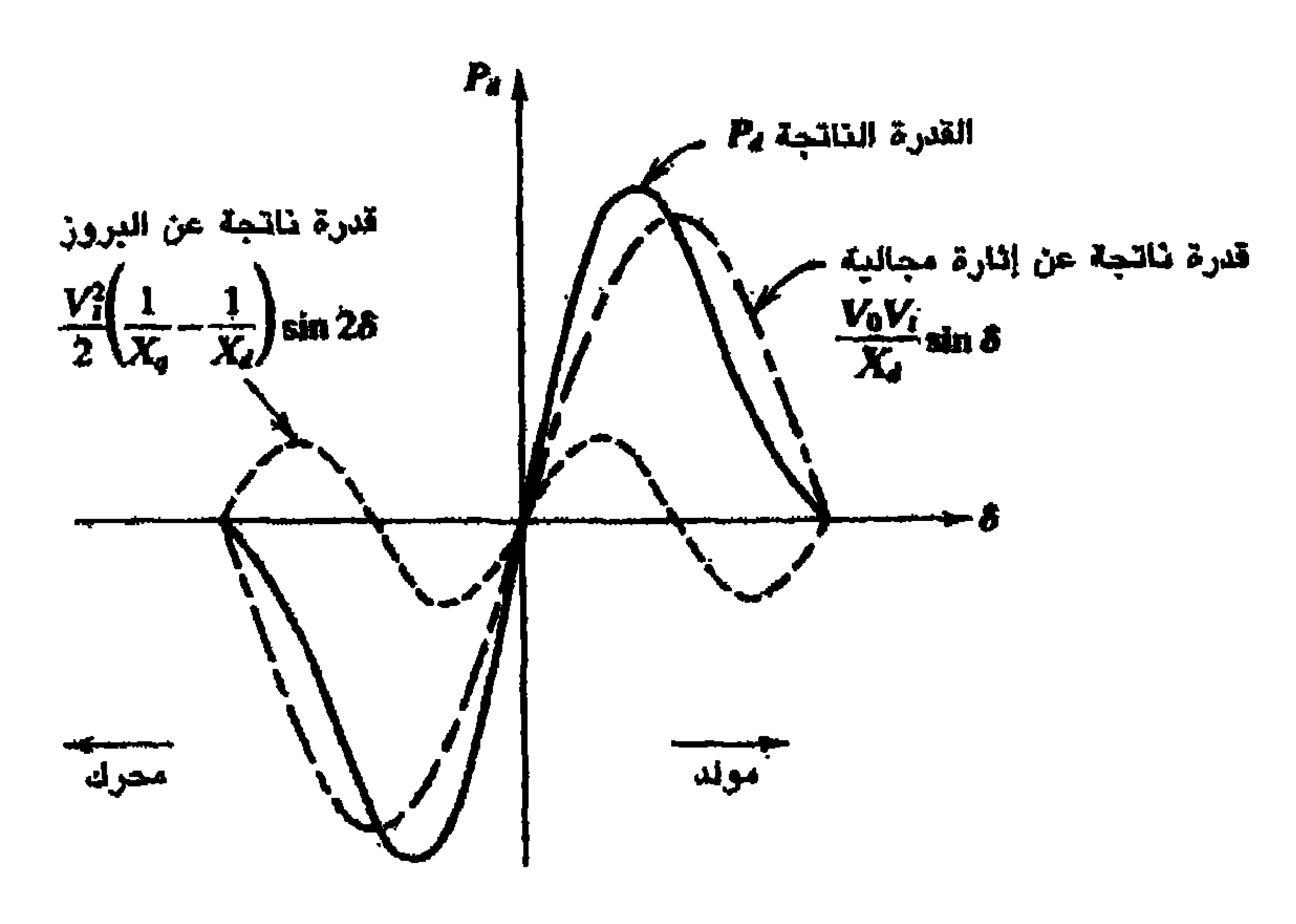
$$I_d X_d = V_0 - V_t \cos\delta \quad \text{و} \quad I_q X_q = V_t \sin\delta \qquad (40.14)$$

بالحل:

لـ I_q وI_d، وعند الإحلال في (39.14) نحصل على:

$$P_d = \frac{V_0 V_t}{X_d}\sin\delta + \frac{V_t^2}{2}\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\sin 2\delta$$

يمكن الحصول على العلاقة (40.14) أيضاً لمحرك ذي أقطاب بارزة، ($\delta<0$)؛ منحني العلاقة (40.14) موضح بالشكل 32.14. لاحظ ان $X_d=X_q=X_s$، تؤول العلاقة (40.41) إلى علاقة الدوار الاسطواني (33.14).

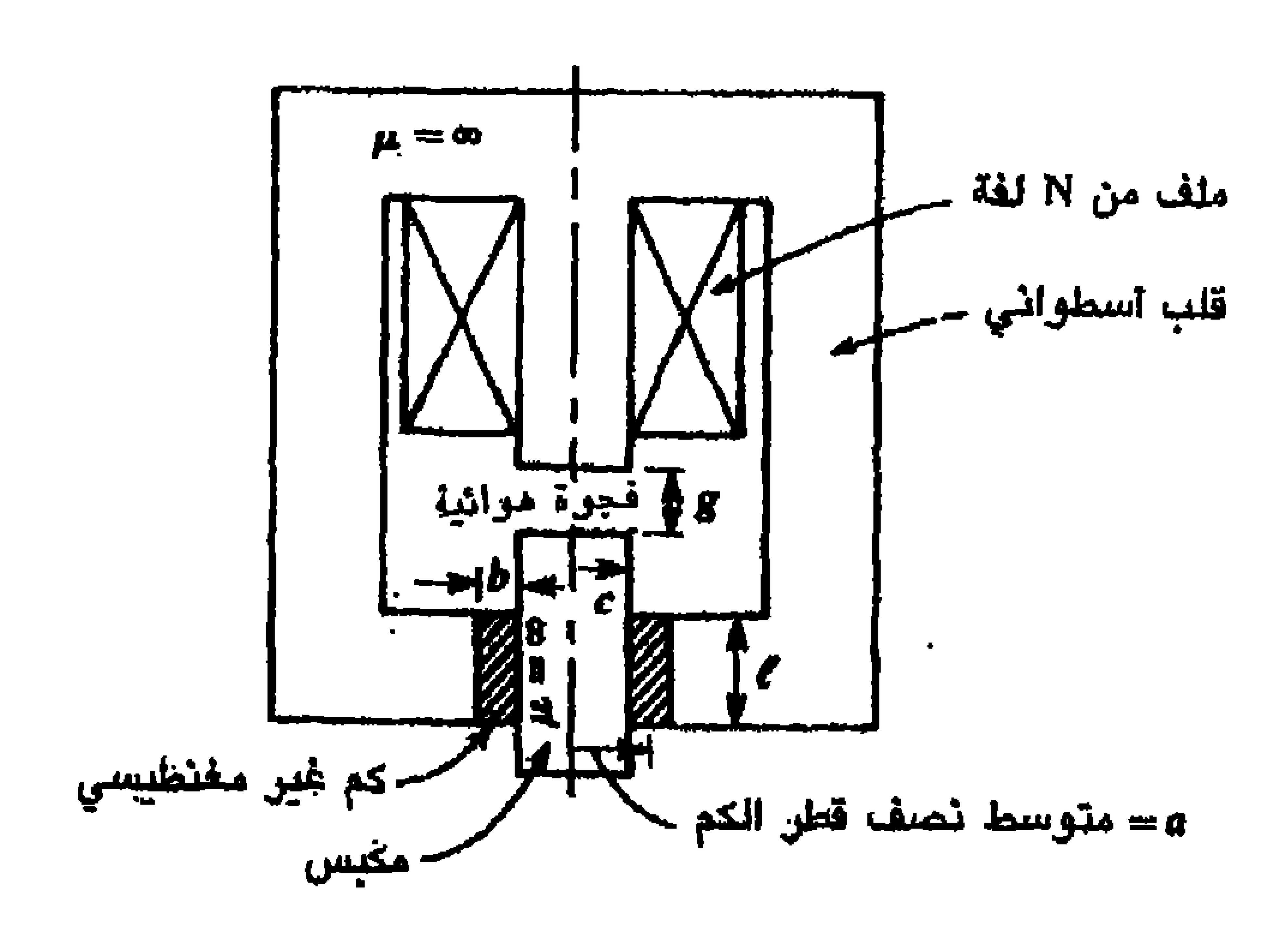


الشكل 32.14. مميزات زاوية القدرة للآلات ذات القطب الناتيء

مسائل محلولة:

انظمة الحركة المتزايدة:

ملف اسطواني مبين بالشكل 33.14 (أ) إذا كان يمر في ملف الإثارة تيار مستمر ثابت، أوجد عبارة القوة على المكبس. (ب) من أجل قيم المفاعلة I=10A، N=500 (لفة) g=5mm، a=20mm، b=2mm، وℓ=40mm، أوجد قيمة القوة؟ افرض $\mu_{core} = \infty$ وأهمل التسرب.



الشكل 33.14

المقاصرة للدائرة المغناطيسية هي:

$$\mathcal{R} = \frac{g}{\mu_0 \pi c^2} + \frac{b}{\mu_0 2\pi a \ell} \qquad c = a - \frac{b}{2}$$

باستخدام (3.13) و $\phi = FR$ في (5.13)، تعطي المحادثة L بالشكل:

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} = \frac{2\pi\mu_0 a \ell c^2 N^2}{2a\ell g + bc^2} \equiv \frac{k_1}{k_2 g + k_3}$$

حيث $k_1 \equiv 2\pi\mu_o a\ell c^2 N^2$ ، $k_2 = 2aU$ ، و$k_3 \equiv bc^2$:

(أ) من (أ14.4):

$$F_e = \frac{\partial}{\partial g}\left(\frac{1}{2}LI^2\right) = \frac{1}{2}I^2\frac{\partial L}{\partial g} = -\frac{I^2 k_1 k_2}{2(k_2 g + k_3)^2}$$

حيث إشارة السالب تعني أن القوة تميل نحو تخفيض فتحة الهواء.

(ب) تبديل القيم في عبارة القوة من (أ) يعطي قيمة القوة 600N

(أ) إذا كان الملف الاسطواني للمسألة 1.14 (أ) يمرر تياراً متاوياً 10A بالقيمة (rms) ويتردد 60 Hz، ما هي القيمة اللحظية للقوة؟ (ب) ما القيمة المتوسطة للقوة إذا اخذت N، g، a، b و ℓ نفس قيم المسألة 1.14 (ب).

(أ)
$$F_e = -\frac{(10\sqrt{2}\cos 120\pi t)^2 k_1 k_2}{2(k_2 g + k_3)^2} = -\frac{100 k_1 k_2}{(k_2 g + k_3)^2}\cos^2 120\pi t \quad (N)$$

(ب) باعتبار أن مربع الجيب Cos له قيمة متوسطة 1/2، متوسط القوة هو نفس القوة نتيجة التيار 10A وقدرها 600N.

في نظام يعتمد على جهد إثارة، أثبت أن القوة الكهربائية يمكن أن يعبر عنها بالشكل:

$$F_e = -\frac{1}{2}\phi^2\frac{\partial \mathcal{R}}{\partial x}$$

حيث Φ هو التدفق في النواة، وR هي محصلة المقاصرة للدائرة المغناطيسية:

لدينا:

$$W_m = \frac{1}{2}Li^2 = \frac{1}{2}\left(\frac{N\phi}{i}\right)i^2 = \frac{1}{2}N\phi\left(\frac{\mathcal{R}\phi}{N}\right) = \frac{1}{2}\mathcal{R}\phi^2$$

وهكذا، من 4.14 (ب) التي فيها الثابت λ يتضمن Φ،

$$F_e = -\frac{\partial W_m}{\partial x} = -\frac{1}{2}\phi^2 \frac{\partial \mathcal{R}}{\partial x}$$

آلات التيار DC:

احسب الجهد المستحث في لفائف الحروكة لآلة تيار مستمر ذات أربعة أقطاب ذات لف تراكبي لها 728 موصلاً فعالاً وتدور بسرعة 1800 rpm . التدفق عبر كل قطب يساوي 30mWb.

باعتبار أن الحروكة هي ذات لف تراكبي، فإن p=a، وكذلك:

$$E = \frac{\phi n z}{60}\left(\frac{p}{a}\right) = \frac{(30 \times 10^{-3})(1800)(728)}{60} = 655.2 \text{ V}$$

ما قيمة الجهد المستحث في حروكة الآلة للمسألة 4.14 إذا كانت اللفات في الحروكة ذات شكل موجي؟ في حالة الحروكة ذات اللفات الموجية a=2 إذن.

$$E = \frac{(30 \times 10^{-3})(1800)(728)}{60}\left(\frac{4}{2}\right) = 1310.4 \text{ V}$$

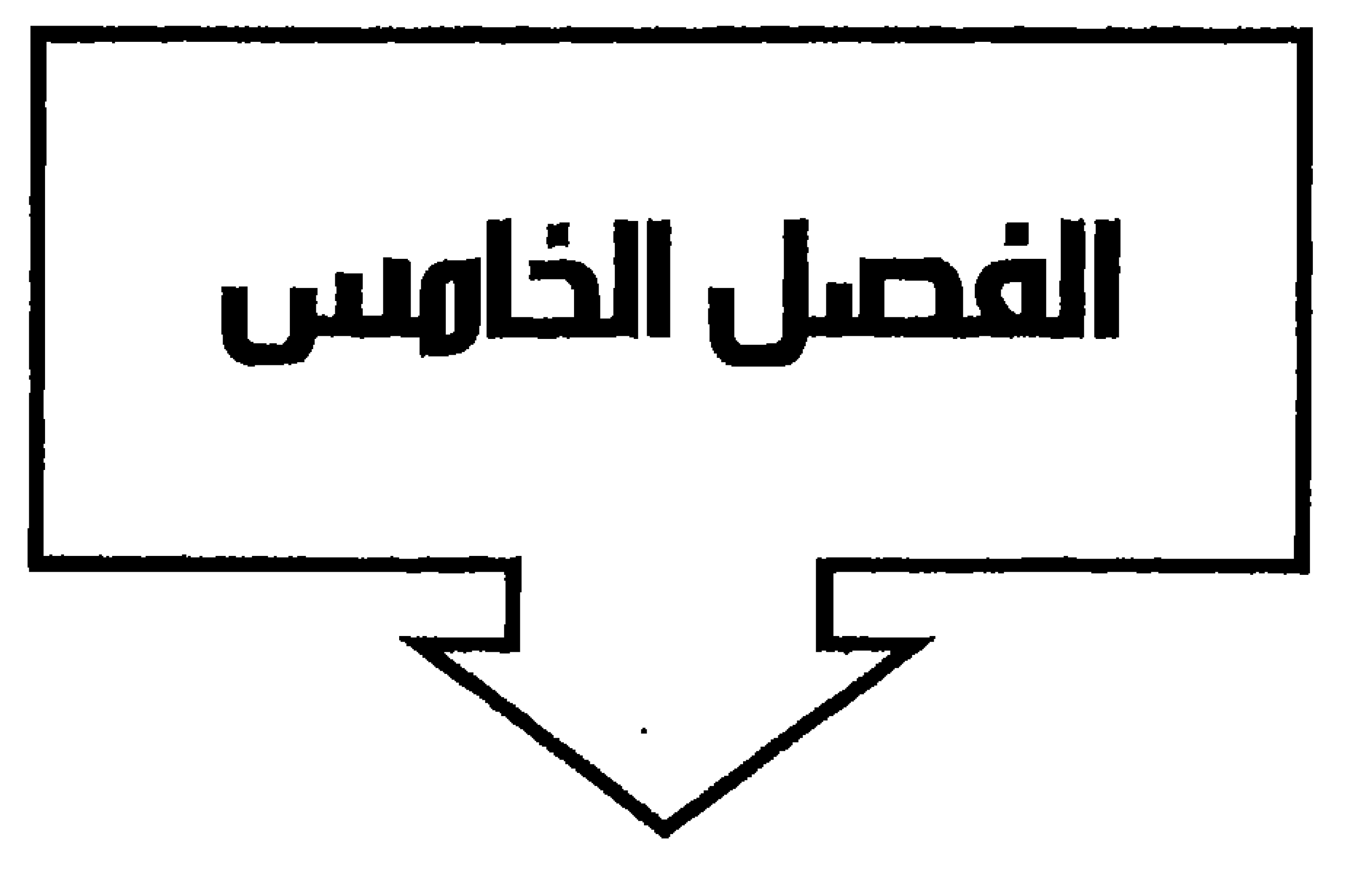
إذا كانت الحروكة في المسألة 4.14 مصممة لنقل تيار أعظم للخط قدره 100A ما هي القيمة العظمى للقدرة العظمى للقدرة الكهرطيسية الناتجة بسبب الحروكة؟

بسبب وجود 4 مسارات متوازية (a=p=4) في الحروكة ذات الشكل الموجي، يمكن لكل مسار أن يمرر تياراً أعظم قدرة:

$$\frac{I_a}{a} = \frac{100}{4} = 25 \text{ A}$$

ولكن القدرة الناتجة عن الحروكة هي:

$$P_d = EI_a = (655{,}2)(100) = 65.5 \text{ kW}$$



المفاهيم الأساسية للمغناطيسية والكهرومغناطيسية

المفاهيم الأساسية للمغناطيسية والكهرومغناطيسية

مقدمة:

يرجع أول تسجيل لظاهرة التأثير المغناطيسي إلى عهود ساحقة في القدم. ويذكر أن الإمبراطور الصيني هوانغ – تي اخترع سنة 2637 قبل الميلاد جهازاً يتكون من مرتكز يحمل شكل امرأة تؤشر دائماً باتجاه الجنوب بغض النظر عن اتجاه تحريك هذا الجهاز. والذي سمي لذلك بالباحث عن الجنوب. وتطور هذا الجهاز ليصبح على شكل علبة في وجهها العلوي ما يدل على الشمال وفي وجهها السفلي ما يدل على الجنوب. وزود جميع سفراء الصين بهذه العلبة، التي عرفت فيما بعد بالبوصلة، لتسهيل عودتهم إلى بلادهم سواء عن طريق البحر أو السهول. ويقال أن الملك سليمان ابن داود قد اخترع البوصلة واستعملها في أسفاره، كما ورد ذكرها فيما بعد في أوديسة هوميروس وفي كتب سقراط.

من الشائع أن كلمة مغناطيس مشتقة من كلمة ماغنيت Magnet نسبة إلى منطقة ماغنيزيا Magnesia في آسيا الصغرى. وتشتهر هذه المنطقة بوجود صخور سوداء لها القابلية على جذب القطع الحديدية ومسامير السفن المارة بالقرب منها. وعند ذلك هذه الصخور، التي تسمى بالمغناطيس الطبيعي، بقطع الحديد بشكل منتظم وباتجاه معين تكتسب الأخيرة صفات الأولى وقابليتها على جذب الحديد ولهذا فإن المغناطيس الجديد يسمى بالمغناطيس الاصطناعي تميزاً له عن المغناطيس الطبيعي. وتوجد أول أشارة إلى إمكانية الحصول على المغناطيس الاصطناعي من عملية الدلك بمغناطيس طبيعي في قاموس صيني صدر سنة 121 بعد الميلاد.

وضع العالم الفيزياوي الإنكليزي وليم جلبرت سنة 1600 كتاباً مهماً اسمه (المغناطيس) ربط فيه بين الظواهر الكهربائية والظواهر المغناطيسية المعروفة في ذلك الوقت. ويعتبر هذا الكتاب العامل الأساسي في تكوين علم الهندسة الكهربائية. وفعلاً بدون المغناطيسية لا يمكن أن يكون هناك ما يسمى

بتكنولوجيا الكهرباء وبالتالي أي تقديم حضاري مناسب، حيث أن المغناطيسية كظاهرة وتطبيق تعتبر أساساً لجميع الأجهزة والأدوات والمكائن الكهربائية المعروفة في الوقت الحاضر.

مفاهيم أساسية:

لدراسة الخواص المغناطيسية لجسم يمكن إجراء التجربة الكلاسيكية البسيطة المعروفة وهي أن نضع قطعة المغناطيس على لوح من الزجاج وننثر برادة الحديد عليه. نلاحظ أن هذه البرادة تتوزع بشكل منتظم مكونة حلقات مغلقة مع قطعة المغناطيس. وإذا أعدنا الكرة فسنحصل على نفس الأشكال بالضبط، مما يدل على أن لهذه الحلقات علاقة مباشرة مع صفات القطعة المغناطيسية. وتسمى هذه الحلقات بخطوط القوى المغناطيسية أو باختصار خطوط القوى Line of force. وتدل هذه الخطوط على أن الوسط المحيط بالقطعة المغناطيسية في حالة إجهاد. ويسمى الفضاء المتأثر بهذا الإجهاد بالمجال المغناطيسي، أما مجموعة خطوط القوى فتسمى بالفيض المغناطيسي أو القبض Flux.

تبين هذه التجربة بشكل بسيط وواضح أهم الخواص العامة والمشتركة بين جميع المواد المغناطيسية. وهي أن لها خطوط قوى مرتبة حسب نموذج هندسي معين يعتمد على شكل القطعة المغناطيسية، وتكون هذه الخطوط مع المادة حلقات مغلقة أو أن الخطوط يجب أن تتصل بطرفي القطعة المغناطيسية من الخطأ التفكير بأن هذه الخطوط هي خطوط حقيقية أنها في الواقع خطوط وهمية استخدمناها كوسيلة مناسبة لتوضيح تأثير المجال المغناطيسي ليس إلا. وتبين هذه التجربة أيضاً بأن القطع المغناطيسية تستقطب خطوط القوى قرب نهاياتها، ولهذا فهذه النهايات تسمى بالأقطاب Poles. ويوجد لكل قطعة مغناطيسية قطبان للتميز بينهما يسمى الأول بالقطب الشمالي ويسمى الثاني بالقطب الجنوبي ويمكن أن يكون للقطعة المغناطيسية أكثر من قطبين إلا أنه يجب أن يكون عدد الأقطاب زوجياً دائماً، أي اثنان، أربعة، ستة... الخ. يمكن تشخيص القطبين الشمالي

والجنوبي من معرفة اتجاه خطوط القوى ويستدل على اتجاه خطوط القوى باستخدام البوصلة التي لو وضعت في طريق هذه الخطوط فإنه ستتجه دائماً باتجاه واحد عند تحريكها من قطب إلى آخر. يسمى القطب الذي تخرج منه خطوط القوى بالقطب الشمالي أما الذي تدخل فيه خطوط القوى فيسمى بالقطب الجنوبي. إذا كان اتجاه الخطوط خارج القطعة المغناطيسية من القطب الشمالي إلى القطب الجنوبي، فاتجاه الخطوط داخلها يكون بالعكس من القطب الجنوبي إلى القطب الشمالي كما هو موضح في شكل رقم 175. ونلخص ما تبقى من خواص المغناطيسية بما يلي:

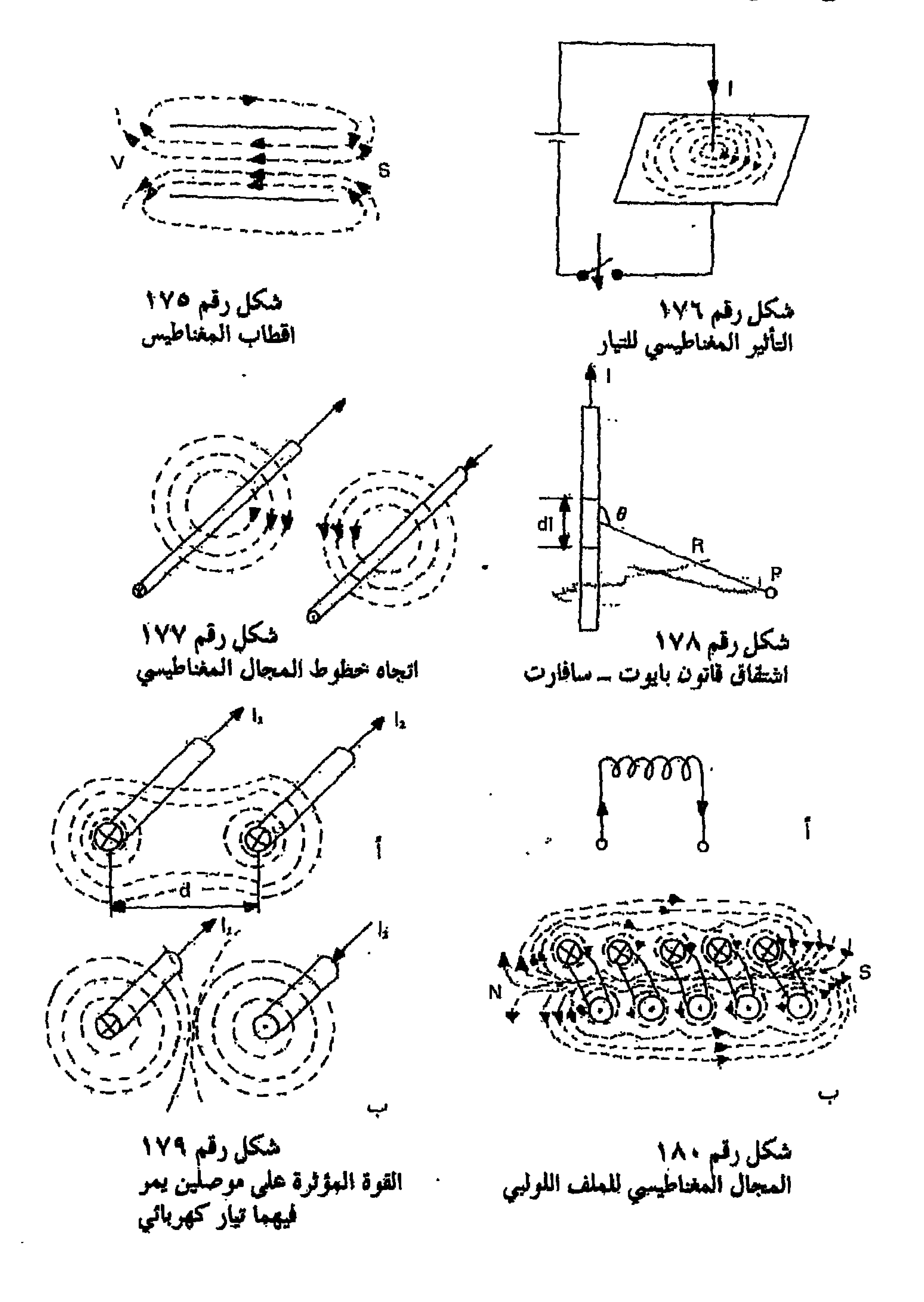
أولاً: عند تقريب قطعة حديد اعتيادية من مغناطيس طبيعي فإنها تكتسب جميع الخواص المغناطيسية من الأخير. إذا أبعدنا المغناطيس الطبيعي عن قطعة الحديد ولم تفقد الأخيرة الخواص التي اكتسبتها فتسمى عند ذلك بالمغناطيس الدائم، وإلا فتسمى بالمغناطيس المؤقت.

ثانياً: عند تقطيع المغناطيسية إلى أجزاء أصغر، فكل قطعة منها ستكون مغناطيس كامل بحد ذاته، له أقطابه وخواصه المغناطيسية.

ثالثاً: لا يمكن أن يكون للمغناطيس قطب واحد أو أقطاب عدد فردي مهما غيرنا من شكله الهندسي أو تركيبه الجزيئي.

رابعاً: الأقطاب المغناطيسية المتشابهة تتنافر والمختلفة تتجاذب.

خامساً: تفقد القطعة المغناطيسية خواصها عند الطرق أو التسخين أو كليهما.



شكل رقم ١٧٥
اقطاب المغناطيس

شكل رقم ١٧٦
التأثير المغناطيسي للتيار

شكل رقم ١٧٧
اتجاه خطوط المجال المغناطيسي

شكل رقم ١٧٨
اشتقاق قانون بايوت ـ سافارت

شكل رقم ١٧٩
القوة المؤثرة على موصلين يمر فيهما تيار كهربائي

شكل رقم ١٨٠
المجال المغناطيسي للملف اللولبي

أمـا الخـواص المهمـة والمعروفـة عـن خطـوط القـوى المغناطيسـية فـيمكن إجمالها بما يلي:

أ. إنها تكوهن على شكل حلقات مغلقة دائماً، ولا يمكن أن توجد خطوط قوى سائبة الطرفين أبداً.

ب. جميع الحلقات التي تمثل خطوط القوى متداخلة أو متركزة، ولا يمكن أن تتقاطع خطوط هذه الحلقات أطلاقاً.

ج. تتمتع بخاصية مطاطية متميزة تساعدها في الرجوع إلى موضعها الأصلي دائماً بعد زوال القوة التي تبعدها عن ذلك الموضوع.

د. جميع الحلقات تكون متناظرة بالنسبة لمحور القطعة المغناطيسية التي كونتها، وعدم التناظر دليل لوجود قوة خارجية تسبب ذلك.

ه. خطوط قوى المجالات المتجاورة تتنافر إذا كان اتجاهها متشابها وتتجاذب إذا كان اتجاهها معاكساً.

و. تسير الخطوط في طريق مستقيم دائماً، أو تسلك أقصر الطرق بين القطبين كلما تيسر ذلك.

ز. تزداد المسافة بين الحلقات الممثلة لخطوط القوى كلما ابتعدنا عن مركزها أو عن محور القطعة المغناطيسية.

ح. تعتمد كثافة خطوط القوى على خواص القطعة المغناطيسية وعلى الوسط الذي تمر فيه.

المجال المغناطيسي للتيار المار في موصل مستقيم:

اكتشف العالم الفيزياوي والفيلسوف الدنماركي هانس كريستيان اويرستد Oersted (1777– 1851) سنة 1820 ظاهرة أساسية مهمة تربط بين التيار الكهربائي والمغناطيسية وتسمى ((الكهرومغناطيسية)) وتنص على أن للتيار المار في موصل أثر مغناطيسي معين يمكن التعرف عليه عند تقريب بوصلة منه. ويعتبر هذا الاكتشاف نقطة الانطلاق في تطور علم الهندسة الكهربائية السريع والذي لم يتوقف لحد الآن.

لتوضيح الظاهرة الكهرومغناطيسية نستخدم تجربة اويرستد البسيطة. نأخذ موصلاً مستقيماً معزولاً ونمرره من مركز لوح من الكارتون ونوصل طرفيه مع بطارية كما مبين في شكل رقم 176. عند غلق المفتاح يكون التيار الكهربائي المار في الموصل مجالاً مغناطيسياً يمكن التعرف على أثره عند نثر برادة الحديد على لوح الكارتون. نلاحظ أن برادة الحديد تأخذ أشكالاً دائرية متداخلة مركزياً (أي يتطابق مركزها مع محور الموصل) تحيط بالموصل. تمثل هذه الدوائر خطوط القوى للمجال المغناطيسي الذي يسببه التيار. لمعرفة اتجاه هذه الخطوط نضع عدد كبيراً من البوصلات الصغيرة على لوح الكارتون، نلاحظ أنها جميعاً تؤشر باتجاه موازي لخطوط القوى أو أنها عمودية دائماً المستوى الذي يقع فيه محور الموصل ومرتكز البوصلة.

عند تغير مسار التيار إلى الاتجاه المعاكس نلاحظ أن البوصلات جميعاً تغير اتجاهها أيضاً بمقدار 180 درجة. وتستخدم عادة اليد اليمنى لتحديد اتجاه خطوط القوى لمجال يتكون نتيجة لمرور تيار في موصل كما يلي:

"اقبض على الموصل بيدك اليمنى بحيث يؤشر الإبهام الموازي لمحور الموصل إلى اتجاه التيار المار فيه، فيكون اتجاه الأصابع الأربعة القابضة على الموصل هو اتجاه خطوط القوى".

إذا رمزنا للتيار المار في الموصل بسهم له رأس مدبب ونهاية مذنبة على شكل علامة الضرب، فعندما يتجه التيار المار في الموصل نحونا نمثله برأس السهم، أي نقطة، وعندما يبتعد عنها نمثله بنهاية السهم أي علامة الضرب كما مبين في شكل رقم 177. لهذا عندما نمثل اتجاه التيار بنقطة (أي أنه يتجه نحونا) فإن اتجاه خطوط القوى التي يسببها يكون عكس اتجاه عقرب الساعة، وعند تمثيله بعلامة الضرب (أي أن يبتعد عنا) فإن اتجاه خطوط القوى يكون باتجاه عقرب الساعة. وسنستفيد من هذا التمثيل كثيراً في المستقبل عند دراسة المكائن الكهربائية حيث يسهل تحليل وبحث المجالات المغناطيسية المتنوعة فيها.

نلخص الملاحظات المهمة عن خطوط القوى هذه بما يلي:

أ. تكون على شكل دوائر مركزية منتظمة يقع مركزها على محور الموصل.

ب. تعتمد كثافة الخطوط بشكل رئيسي على شدة التيار المار في الموصل.

ج. يعتمد اتجاه الخطوط على اتجاه التيار فقط.

ذكرنا سابقاً بأن مجموعة خطوط القوى لمجال مغناطيسي تعطي ما يسمى بالفيض المغناطيسي إلا أن ما يعطي خصائص هذا المجال هي كثافة الخطوط عند نقاطه المختلفة، ويسمى هذا المقدار بكثافة الفيض المغناطيسي Flux – density ويرمز له بالحرف B. وكثافة الفيض هي عدد خطوط القوى التي تخترق بشكل عمودي مقطع مساحته متر مربع واحد، أو انه الفيض المغناطيسي على المساحة التي يمر فيها. إذا رمزنا للفيض المغناطيسي بالحرف Φ وللمساحة التي يمر فيها بالحرف A فإن كثافة الفيض تساوي.

$$B=\Phi/A \qquad (13-1)$$

وحدة الفيض في النظام العالمي هي الويبر نسبة إلى العالم الفيزياوي الألماني وليم ادورد ويبر Weber (1804 – 1891) ويساوي الويبر الواحد مائة مليون خط قوى. ويستعمل المللي ويبر لمناسبته لأغلب التطبيقات العملية حيث يساوي مائة ألف خط قوى، إذن وحدة كثافة الفيض هي تسلا (ويبر/ م2) ويمكن اشتقاقها حسب قانون بايوت . سافارت. جين بابتست بايوت Biot هو عالم رياضي وفيزياوي فرنسي (1774 – 1862) وفيليكس سافارت Savart هو عالم فيزياوي فرنسي أيضاً (1791 – 1841). ويمكن توضيح هذا القانون كما يلي:

لنفرض أن تياراً مقداره I أمبير يمر في موصل طوله الكلي يساوي L متر. لإيجاد كثافة الفيض في نقطة ما تبعد d متر عن محور الموصل، نأخذ طولاً متناهياً في الصغر من هذا الموصل، لنفرض dl متر، بحيث يشكل مع تلك النقطة زاوية معينة مقدارها θ كما هو مبين في شكل رقم 178. إذن كثافة الفيض dB في

هذه النقطة نتيجة مرور التيار في الموصل تتناسب طردياً مع شدة التيار وطول الموصل وجيب الزاوية θ وعكسياً مع مربع المسافة بين هذا الطول وتلك النقطة.

$$|dB| = K \frac{I.dL.\sin\theta}{d^2}$$

حيث تعني K هنا وجود ثابت للتناسب يعتمد على خواص الوسط المغناطيسية، ويساوي هذا الثابت في النظام العالمي للوحدات

$$K = \mu / 4\pi$$

المقدار μ هو هنا نفاذية الوسط وسنعود لبحثه بالتفصيل في الفصل التالي.

وحدة النفاذية هي هنري على متر. إذا كان الوسط الذي تمر فيه خطوط القوى هو الهواء فنفاذيته ثابتة ومعروفة حيث تساوي

$$\mu_o = 4\pi x 10^{-7} [H/m]$$

وإذا كان الموصل طويلاً جداً والنقطة تحت البحث تقع في مستوى عمودي على طول الموصل dI (أي الزاوية $\theta = 90^o$)، فكثافة الفيض تساوي

$$B = \frac{\mu_0 \, IL}{4\pi d^2} \doteq \frac{IL}{d^2} \, 10^{-7}$$

ووحدة الكثافة إذا أخذنا بنظر الاعتبار أن الهنري يساوي اوم – ثانية، هي:

$$[B] = \frac{H}{m} \cdot \frac{m.A}{m^2} = \frac{HA}{m^2}$$

$$= \frac{ohm - sec. A}{m^2} = \frac{V - sec}{m^2}$$

وتخليداً للعالم ويبر أصبحت الفولت . ثانية في النظام العالمي وحدة تحمل اسمه، أي ويبر Weber إذن

$$[B] = [Web/m^2]$$

الويبر هو وحدة الفيض المغناطيسي. وكانت الوحدة المستعملة سابقاً هي الماكسويل نسبة إلى العالم الفيزياوي الإنجليزي جيمس ماكسويل Maxwell (1831 – 1879) الماكسويل الواحد يساوي خط قوة مغناطيسية واحدة، إذن

الويبر الواحد = 10^{8} ماكسويل

الماكسويل الواحد = 10^{-8} فولت – ثانية

واستبدلت وحدة كثافة الفيض في النظام العالمي إلى تسلا تقديراً للعالم اليوغسلافي المعروف نيقولاي تيسلا Tesla (1857– 1943) وتساوي التسلا الواحد ويبر على متر مربع أو مائة مليون خط قوى على متر مربع وكانت وحدة كثافة الفيض المستعملة سابقاً هي الغاوس نسبة إلى العالم الرياضي والفيزياوي الألماني كارل فردريك غاوس Gauss (1777– 1855)، حيث ان:

الغاوس الواحد = ماكسويل / سنتيمتر مربع واحد.

التسلا الواحدة = 10^{8} ماكسويل / 10^{4} سنتيمتر مربع = 10^{4} غاوس

الغاوس الواحد = 10^{-4} تيسلا = 10^{-4} فولت – ثانية / متر مربع

مثال: ما هي كثافة الفيض بالتسلا لمجال عدد خطوطه المارة خلال مقطع مستطيل الشكل أبعاده 400 سم × 50 سم هي 40 مليون خط.

الحل: نحول أولاً عدد الخطوط إلى ويبرات، حيث يساوي الويبر الواحد مائة مليون خط.

الفيض بالويبرات يساوي:

$$\phi = 4 \times 10^7 \text{ lines of force} = 0.4 \text{ Web}$$

ومساحة المقطع المستطيل الشكل تساوي:

$$A = 400 \times 50 = 20000 \text{ cm}^2 = 2\text{m}^2$$

إذن كثافة الفيض بالتسلا تساوي:

$$B = \phi/A = 0.4/2 = 0.2 \text{ Tesla}$$

مثال: قضيب حديدي يتكون من جزئين كل منهما ذو مساحة مقطع دائرية الشكل. قطر الجزء الأول سنتيمتران والثاني أربعة سنتمترات ما هي كثافة الفيض في كل جزئي القضيب إذا كان الفيض المار فيه يساوي نصف مللي ويبر؟

الحل: أن الفيض المار في الجزئين واحد لا يتغير.

مساحة مقطع الجزء الأول:

$$A_1 = (\frac{0.02}{2})^2 . \pi = 3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

ومساحة مقطع الجزء الثاني:

$$A_2 = (\frac{0.04}{2})^2 . \pi = 12.56 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

كثافة الفيض في الجزء الأول:

$$B_1 = \phi/A_1 = 0.5 \times 10^{-3}/3.14 \times 10^{-4} = 1.59 \text{ Tesla}$$

وكثافة الفيض في الجزء الثاني

$$B_2 = \phi/A_2 = 0.5 \times 10^{-3}/12.56 \times 10^{-4} = 0.398 \text{ Tesla}$$

المجال المغناطيسي لموصلين متوازيين:

عند مرور تيارين كهربائيين في موصلين متوازيين المسافة بينهما هي d متر، فسيكون لكل موصل مجاله المغناطيسي الخاص والمتمثل بخطوط القوى الدائرية الشكل. إذا تطابق اتجاه التيارين (لنفرض أنهما يبتعدان عنا) كما في شكل 179 أ، فيكون اتجاه هذه الخطوط متطابقاً مع اتجاه عقارب الساعة. عند منتصف المسافة بين هذين الموصلين يتعاكس اتجاه خطوط القوى العائدة لهما فيمحي بعضهما الآخر. ولما كان من خواص خطوط القوى أنها يجب أن تكون مغلقة، تتلاقى الأطراف الخارجية السائبة، للحلقات التي فقدت بعض أجزاءها في المنطقة الوسطية لتشكل حلقات مشتركة بين مجالي الموصلين كما مبين في الشكل. ومن الخاصية المطاطية لهذه الخطوط تنشأ قوة جذب بين الموصلين تحاول شدهما إلى بعض تتناسب قوة الجذب هذه بشكل مشابه لقانون كولوم تقريباً، طردياً مع شدة التيار في الموصلين ومع طولهما، وعكسياً مع المسافة بينهما.

أن الموصل الأول طبعاً يقع ضمن المجال المغناطيسي للموصل الثاني العكس بالعكس. كثافة فيض الموصل الثاني نتيجة تأثير مجال الموصل الأول عليه تستخرج حسب قانون بايوت — سافارت، أو:

$$B = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (13\text{-}2)$$

وقوة الجذب المسلطة على هذا الموصل لكل متر من طوله يقع ضمن المجال المغناطيسي للموصل الأول تساوي.

$$f_a = B I_2 = \frac{\mu_0 I_1 . I_2}{2\pi d} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (13\text{-}3)$$

اللاحقة (a) للدالة على قوة الجذب Attraction:

$$f_a = 2 \times 10^{-7} I_1.I_2/d$$

ووحدة هذه القوة هي نيوتن لكل متر طول.

ويمكن ان نصيغ تعريف الامبير وحدة التيار الكهربائي، استناداً إلى هذا التعبير. حيث أنه لو كانت شدة التيارين المارين في موصلين يقعان على بعد متر واحد من بعضهما هي أمبير واحد، نستطيع أن نقول أن الأمبير هو:

(التيار الذي لو مر في موصلين متوازيين طويلين يقعان في الهواء لتسبب في قوة جذب بينهما تساوي 2×10^{-7} نيوتن لكل متر طول).

في حالة اختلاف اتجاه التيارين المارين في الموصلين نلاحظ أن اتجاه خطوط القوى في المنطقة التي تتوسط المسافة بين الموصلين يكون متطابقاً كما مبين في شكل 179 ب. وزيادة خطوط القوى أو تقوية المجال في هذه المنطقة تؤدي إلى تكوين قوة تنافر تحاول أبعاد الموصلين الواحد عن الآخر. مقدار هذه القوة والتعبير عنها يتحدد بشكل مشابه لقوة الجذب.

$$f_r = f_a = 2 \times 10^{-7} I_1.I_2/d \text{ [N/m]}$$

اللاحقة (r) هنا للدلالة على قوة التنافر Repulsion.

مثال: ثلاثة موصلات متوازية تقع في مستوى واحد المسافة بين الأول والثاني، والثاني والثالث هي متر ومتران على التعاقب. تياراً الموصلين الأول والثاني متساويان بالمقدار ومتعاكسان بالاتجاه ويساوي كل منهما 200 أمبير. ما هو مقدار واتجاه التيار في الموصل الثالث إذا كانت القوة المسلطة على الموصل الثاني هي نصف نيوتن لكل متر وتتجه نحو الموصل الثالث؟ لتبسيط الحل أهمل التأثير المتبادل بين الموصلين الأول والثالث.

الحل: القوة التي يسلطها الأول على الموصل الثاني، هي (قوة تنافر)

$$f_{12} = 2 \times 10^{-7} \times 2000 \times 2000 = 0.8\ N/m$$

هذه القوة نفسها مسلطة من الموصل الثاني على الموصل الثالث (قوة الجذب) لما كانت القوة النهائية التي ينجذب فيها الموصل الثاني نحو الثالث هي نصف نيوتن لكل متر، إذا يجب أن يكون هناك قوة تنافر بين الموصل الثالث والثاني مقدارها:

$$f_{32} = 0.8 - 0.5 = 0.3\ N/m$$

إذن اتجاه التيار في الموصل الثالث يكون عكس اتجاه التيار في الموصل الثاني ونفس اتجاه التيار في الموصول الأول، ومقداره يساوي

$$I_3 = df/2 \times 10^{-7} \times I_2$$

$$= \frac{2 \times 0.3}{2 \times 10^{-7} \times 2000} = 1500\ A$$

المجال المغناطيسي للملف اللولبي:

عند حني الموصل الطويل على شكل حلقات متقاربة يشبه شكلها العام الأسطوانة فإن هذه الحلقات تسمى بالملف اللولبي Solenoid كما مبين في شكل 180أ.

لدراسة المجال المغناطيسي الذي يتكون نتيجة لمرور التيار الكهربائي في هذا الملف اللولبي، نرسم الملف كما لو أنه قد قطع من الوسط بموازاة المحور الطولي. نختار اتجاه التيار كيفما اتفق ولنفرض أنه كما مبين في شكل 180 ب. أي أن اتجاه التيار في مقطع الموصلات العلوية يكون مبتعداً عنا، وفي السفلية متجهاً نحونا. لهذا يكون اتجاه الخطوط المغناطيسية للموصلات العلوية باتجاه عقرب

الساعة، بينما للسفلية عكس عقرب الساعة. ولما كان اتجاه التيار في جميع الموصلات العلوية متشابها، وكذلك في السفلية، فيمكن عند ذلك دمج خطوط القوى الخارجية للموصلات ذات التيار المتطابق بالاتجاه لتكوين حلقات مشتركة بين جميع هذه الموصلات كما مبين في شكل رقم 180ب. إذا كان طول الملف اللولبي يفوق كثيراً قطره فإن خطوط القوى داخل الملف تكون على شكل خطوط مستقيمة موازية للمحور الطولي، ويكون المجال في هذه الحالة متجانساً.

أن خطوط القوى للمجال الكلي للملف تدخل من أحد أطرافه وتخرج من الطرف الآخر بشكل مشابه لما لاحظناه في حالة القضيب المغناطيسي المبين في شكل رقم 175. ونسمي أيضاً الطرف الذي تخرج منه خطوط القوى بالقطب الشمالي، والذي تدخل فيه بالقطب الجنوبي. نستخدم اليد اليمنى لتسهيل تحديد أقطاب الملف اللولبي بشكل عام. لهذا الغرض نقبض على الملف باليد اليمنى بحيث تكون الأصابع الأربعة منحنية باتجاه التيار، فيؤشر الإبهام الموازي لمحور الملف في هذه الحالة إلى القطب الشمالي. تعتمد أقطاب المجال المغناطيسي للملف اللولبي بالدرجة الأولى على اتجاه التيار المار في الملف وعلى اتجاه لف الملف. يبين شكل رقم 181 الاحتمالات الأربعة المختلفة التي يمكن لأقطاب الملف أن تكون عليها.

القوة الدافعة المغناطيسية:

إن مقدار الفيض المغناطيسي للملف اللولبي يزداد كلما ازدادت شدة التيار الكهربائي المار فيه I وكلما ازدادت عدد لفات هذه الملف N. لهذا فإن الفيض يتناسب طردياً مع حاصل ضرب شدة التيار في عدد لفات الملف. ويسمى حاصل الضرب هذا بالقوة الدافعة المغناطيسية Magnetomotive Force، أو باختصار mmf، ويرمز لها بالحرف F إذن:

$$F=IN$$

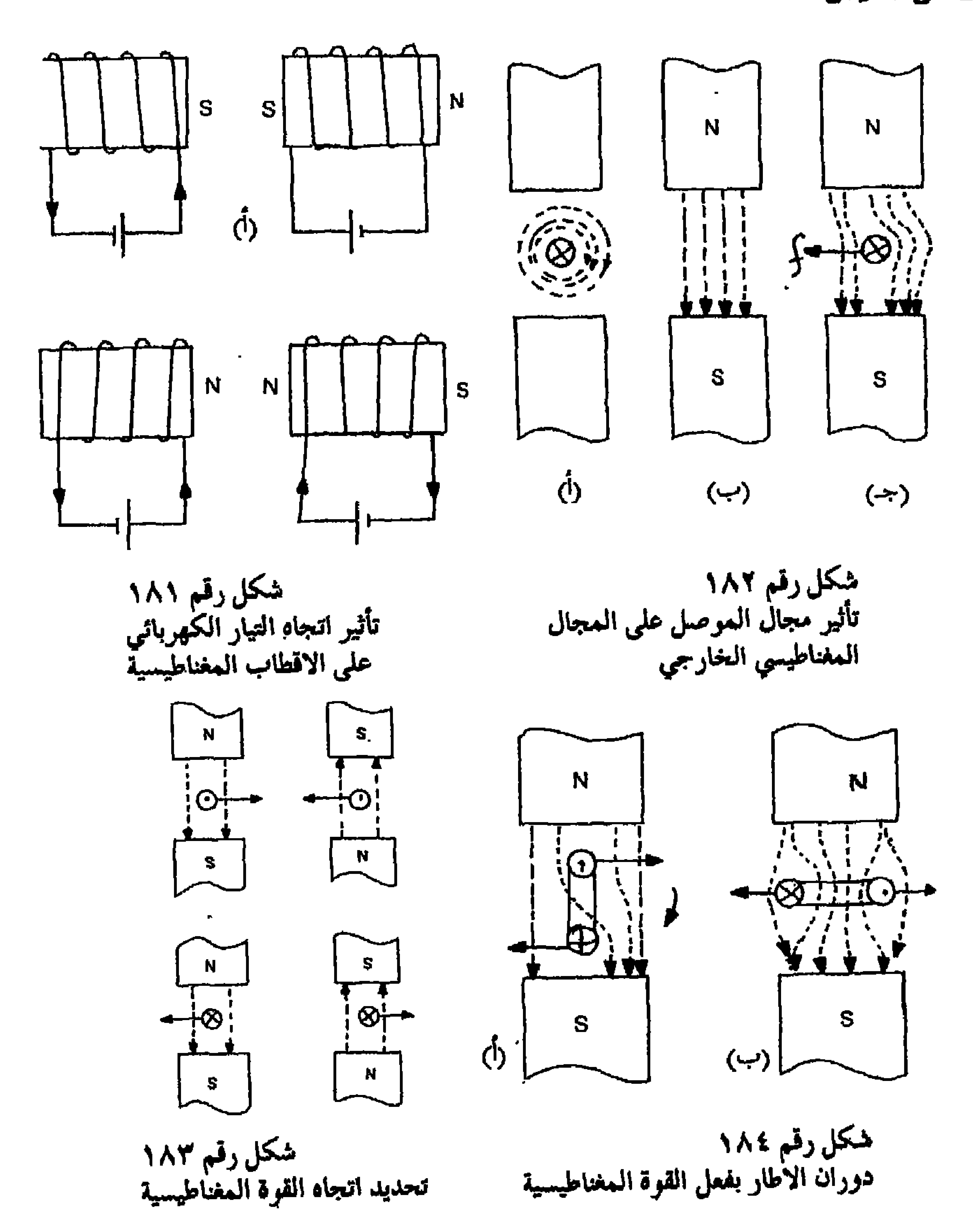
وحدة القوة الدافعة المغناطيسية هي أمبير – لفة Ampere – Turns (AT) لهذا فإن الفيض المغناطيسي لملف يتكون من 100 لفة ويمر فيه تيار مقداره 10 امبيرات يساوي الفيض المغناطيسي لملف يتكون من 20 لفة ويمر فيه تيار مقداره 50 أمبير عند تشابه الوسط في الحالتين. والسبب هو أن القوة الدافعة المغناطيسية التي يكونها الملفان هي واحدة وتساوي 1000 امبير – لفة.

كانت وحدة القوة الدافعة المغناطيسية لغاية عام 1950 هي الجلبرت نسبة إلى العلم وليم جلبرت William Gilbert.

مثال: ما هي القوة الدافعة المغناطيسية لملف يتكون من 1000 لفة ويمر فيه تيار مقداره 600 مللي أمبير.

الحل: نعبر عن التيار بالأمبيرات

$$I = 600\ mA = 0.6A$$



شكل رقم ١٨١
تأثير اتجاه التيار الكهربائي
على الاقطاب المغناطيسية

شكل رقم ١٨٢
تأثير مجال الموصل على المجال
المغناطيسي الخارجي

شكل رقم ١٨٣
تحديد اتجاه القوة المغناطيسية

شكل رقم ١٨٤
دوران الاطار بفعل القوة المغناطيسية

نستخرج القوة الدافعة المغناطيسية:

$$F - 0.6 \times 1000 = 600AT$$

مثال: ما هو الجهد الذي لو سلط على ملف يتكون من 1500 لفة وممانعته 750 اوم لسبب قوة دافعة مغناطيسية مقدارها 240 أمبير لفة.

الحل: نستخرج أولاً مقدار التيار المار في الملف

$$I = F/N = 240/1500 = 0.16\ A$$

مقدار الجهد إذن يساوي:

$$V = IZ = 0.16 \times 750 = 120\ V$$

نلاحظ عند وضع قطعة حديدية داخل الملف اللولبي الذي يمر فيه تيار بأن المجال المغناطيسي يزداد إلى أضعاف عديدة. بالرغم من بقاء القوة الدافعة المغناطيسية ثابتة. والسبب هو أن لقطعة الحديد قابلية تمغنط عالية تختلف عن الهواء (الوسط الذي كانت تمر فيه الخطوط قبل وضع قطعة الحديد) كثيراً. تسمى قطعة الحديد هذه بالقلب أو اللب Core ويسمى القلب والملف معاً بالمغناطيس الكهربائي Electromagnet. وتعتمد الزيادة الكلية للمجال المغناطيسي على نوعية القلب المستعمل أو نفاذيته وكذلك على أبعاده. فكلما ازدادت النفاذية المغناطيسية للقلب كلما يقوى المجال المغناطيسي للمغناطيس الكهربائي وتزداد خطوطه. ويستفاد من هذه الظاهرة بشكل واسع في جميع الأجهزة والأدوات والمكائن الكهربائية حيث تصمم ملفاتها كي توضع على الأجزاء أو الأقطاب الحديدية ذات النفاذية العالية. ويزداد المجال المغناطيسي أيضاً كلما ازدادت مساحة مقطع القلب الحديدي أو صمم على شكل حلقة أو دائرة مستمرة ومغلقة.

شدة المجال المغناطيسي:

إن كثافة الفيض المغناطيسي داخل القلب الحديدي للمغناطيس الكهربائي تختلف عن تلك خارج هذا القلب. لهذا فإن مقدار القوة الدافعة المغناطيسية في وحدة الطول الضروري لضمان تدفق الفيض المغناطيسي يكون مختلفاً لاختلاف الوسطين الذين تمر فيهما خطوط القوى. إن هذا المقدار يسمى

بقوة التمغنط أو شدة المجال المغناطيسي Field Strength ويرمز له بالحرف H، إذن شدة المجال هي القوة الدافعة المغناطيسية على وحدة الطول أو

$$H = F/l = IN/l \quad \text{.........} \quad (13\text{-}4)$$

وبالفعل لما كانت شدة المجال تختلف من نقطة إلى أخرى على طول الحلقة الواحدة الممثلة لخط القوة المغناطيسي، فإن القوة الدافعة المغناطيسية الضرورية لتكوين الفيض المطلوب على طول dl مثلاً من هذه الحلقة تساوي حاصل ضرب شدة المجال في هذا الطول:

$$dl = H.dl$$

والقوة الدافعة المغناطيسية الكلية تساوي مجموع جميع المقادير Hdl على طول الحلقة الواحدة، أو تساوي التكامل الخطي لشدة المجال مضروبة في الطول الكلي لخط القوى المعين.

$$F = \oint H.dl$$

حيث تدل الدائرة الموجودة على إشارة التكامل بأن عملية التكامل هي لدائرة مغلقة.

وحدة شدة المجال المغناطيسي في النظام العالمي للوحدات هي أمبير – لفة / متر (AT/m) وأحيانا للاختصار (A/m). والوحدة المستعملة سابقاً لهذا المقدار هي الأويرستد حيث أن الاويرستد الواحد = 79.6 أمبير. لفة / متر ≈ 80 أمبير. لفتة / متر.

تتناسب كثافة الفيض طردياً تقريباً مع شدة المجال. وثابت التناسب هنا هو نفاذية الوسط الذي تمر فيه خطوط القوى لهذا:

$$B = \mu H$$
$$H = B/\mu$$
$$\mu = B/H$$

مثال: مغناطيس كهربائي يتكون من حلقة متوسط طولها 30 سم وملف يحتوي على 400 لفة يمر فيه تيار مقداره 300 مللي أمبير. ما هي شدة المجال المغناطيسي لهذه الحلقة.

الحل: نستخرج أولاً القوة الدافعة المغناطيسية.

$$F=IN=300 \times 10^{-3} \times 400 = 120\ AT$$

إذن شدة المجال تساوي:

$$H=F/l=120/30 \times 10^{-2} = 400\ A/m$$

المقاومة المغناطيسية أو المعاوقة:

بغض النظر عن الوسط الذي تمر فيه خطوط القوى المغناطيسية أو الفيض، فإنها دائماً تجابه مقاومة معينة لمرورها خلال هذا الوسط. وتسمى هذه المقاومة بالمقاومة المغناطيسية أو المعاوقة Re/uctance ويرمز لها بالحرف S. تعتمد المعاوقة على أبعاد الوسط الذي يمر فيه الفيض وعلى نوعية ونفاذية هذا الوسط. ويمكن اشتقاق التعبير عنها كما يلي:

$$\phi = (B).A = (\mu H).A$$
$$= (\mu \frac{F}{l}).A = \frac{F.}{l/\mu A} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (13\text{-}5)$$

ومن الشبه الكبير بين هذا التعبير وقانون أوم الذي درسناه سابقاً نستطيع أن نقول أن المعاوقة تساوي:

$$S = \frac{l}{\mu A} = \left[\frac{m}{\frac{H}{m} \times m^2} \right] = \left[\frac{1}{H}\right]$$

$$= \frac{F}{\phi} = \left[\frac{AT}{Web}\right] \quad \text{.......................................} \quad (13\text{-}6)$$

أي أن وحدة المعاوقة هي امبير – لفة / ويبر، أو أيضاً هي مقلوب الهنري.

مثال: ما هي معاوقة قضيب من الحديد طوله 31.4 سم وقطره 4 سم ونفاذيته تساوي مللي هنري واحد على متر.

الحل: نستخرج مساحة مقطع القضيب:

$$A = \left(\frac{4 \times 10^{-2}}{2}\right)^2 \times \pi = 12.57 \times 10^{-4}\ m^2$$

المعاوقة تساوي:

$$S = \frac{l}{\mu A} = \frac{31.4 \times 10^{-2}}{0.001 \times 12.57 \times 10^{-4}} = 2.5 \times 10^4$$

تأثير مرور التيار في موصل يقع ضمن مجال مغناطيسي:

عندما يوضع موصل يمر فيه تيار كهربائي ضمن مجال مغناطيسي خارجي نلاحظ بأن هذا المجال يسلط قوة على الموصل تحاول طرده خارج حدود المجال. وسبب هذه القوة هو التفاعل المتبادل بين المجال المغناطيسي الخارجي وذلك الموصل.

لنأخذ موصل ما ونمرر فيه تياراً كهربائياً في الاتجاه الذي يبتعد عنا كما مبين في شكل رقم 182 (أ) اتجاه خطوط المجال لهذه الحالة يكون باتجاه عقرب الساعة. نأخذ أيضاً قطعة من المغناطيس بحيث يكون قطبها الشمالي في الجهة

العلوية والجنوبي في السفلية، أي أن خطوط القوى تتجه هنا من الأعلى على الأسفل كما مبين في شكل 182 (ب). لبحث التأثير المتبادل بين هذين المجالين نضع الموصل ضمن المجال المغناطيسي للقطعة ذات القطبين كما مبين في شكل رقم 182 (ج). نلاحظ أن خطوط القوى لكلا المجالين والواقعة على يمين الخط المنقط (رسم للتوضيح فقط) تتطابق في الاتجاه، مما يؤدي إلى تقوية المجال المغناطيسي في هذه المنطقة وزيادة كثافة خطوطه، بينما تتعاكس الخطوط الواقعة على يسار هذا الخط المنقط بالاتجاه مما يؤدي إلى أضعاف المجال المغناطيسي في هذه المنطقة ونقصان كثافة الخطوط بشكل واضح. أن ازدياد كثافة الخطوط على الجهة اليمنى يؤدي إلى تزاحمها وانحنائها. ولما كانت الخطوط ذات خاصية مطاطية تدفعها للسير في طريق مستقيم فستبذل الجهد لتقويم هذا الانحناء وتسلط أثناء ذلك قوة معينة على الموصل محاولة طرده إلى خارج حدود المجال المغناطيسي.

يمكن إيجاد اتجاه القوة التي يسلطها المجال الخارجي على الموصل الذي يمر فيه تيار كهربائي باستخدام قاعدة اليد اليسرى، التي تسمى أحياناً بقاعدة فلمنغ Fleming، كما يلي:

"أبسط يدك اليسرى داخل المجال المغناطيسي بشكل بحيث تكون راحة يدك مواجهة للقطب الشمالي. إذا مثل اتجاه الأصابع الأربعة المتعامدة مع الإبهام اتجاه التيار الكهربائي المار في الموصل، فإن الإبهام يؤشر إلى اتجاه القوة الطاردة".

من الواضح أن اتجاه هذه القوة يعتمد على اتجاه التيار المار في الموصل وعلى اتجاه خطوط القوى للمجال المغناطيسي الخارجي. شكل رقم 183 يبين الاحتمالات الأربعة المختلفة التي يمكن أن يكون فيها اتجاه القوة الطاردة.

يعتمد مقدار القوة الطاردة على كثفافة فيض المجال الخارجي B، على شدة التيار المار في الموصل I، على الطول الفعال للموصل (الذي يقصد به الجزء الواقع ضمن المجال المغناطيسي) وعلى جيب الزاوية المحصورة بين اتجاه التيار واتجاه خطوط القوى α، إذن القوة انطاردة تساوي:

$$f=BIl\ \sin\alpha[N]$$

طبعاً إذا كان الموصل موازياً لخطوط القوى ($\alpha=O$) فلا توجد أية قوة مؤثرة على الموصل، أما إذا كان الموصل متعامداً مع خطوط القوى فإن القوى الطاردة تأخذ أقصى قيمة ممكنة لها، أي

$$f_m=BIl[N] \qquad (13-7)$$

ويستفاد من هذا التعبير لتعريف وحدة كثافة الفيض المغناطيسي حيث أنه لو كان مقدار القوة الطاردة يساوي نيوتن واحد عند مرور تيار مقداره أمبير واحد في موصل طوله متر واحد، فإن كثافة الفيض تساوي وحدة واحدة أذن وحدة كثافة الفيض هي المقدار الذي يكون مجالاً مغناطيسياً مؤثراً على موصل (عمودياً على خطوطه) طوله متر واحد ويمر فيه تيار مقداره أمبير واحد بقوة مقدارها نيوتن واحد. أو أن وحدة القوة هي:

$$[f] = Newton = Joule/m = Watt - sec/m = VA - sec/m$$

إذن وحدة كثافة الفيض تساوي:

$$[B] = \frac{f}{Il} = \frac{VA - sec}{m\ A\ m} = \frac{V - sec}{m^2}$$

$$= Web/m^2 = Tesla$$

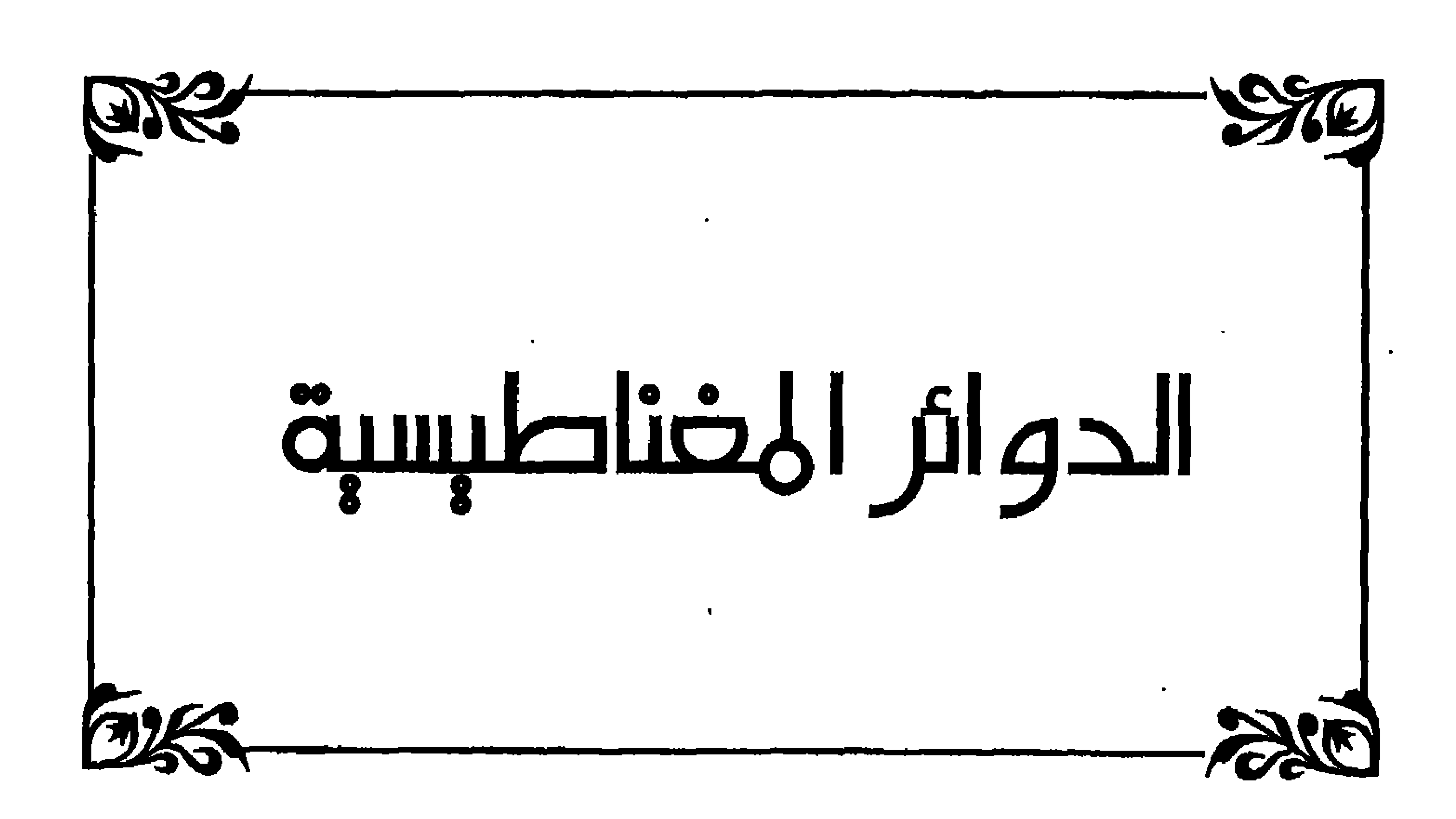
لو جعلنا الموصل على شكل إطار ووضعناه ضمن المجال المغناطيسي للأقطاب لحصلنا على ظاهرة مهمة هي الأساس لتحويل الطاقة الكهروميكانيكي ولعمل المحركات الكهربائية وأجهزة القياس المتنوعة.

نضع هذا الإطار ضمن المجال المغناطيسي ولنفرض أن اتجاه التيار يكون كما مبين في شكل 184 أ، أي أن اتجاه التيار في مقطع الموصل العلوي يختلف عنه في مقطع الموصل السفلي. لهذا فإن اتجاه القوة على جانبي الإطار تكون متعاكسة

كما هو واضح من الشكل. ولو كان في الإمكان وضع الإطار على محور ضمن المجال المغناطيسي بحيث يمكن تحريكه بحرية فإن هاتين القوتين، العلوية والسفلية، ستحركان الإطار لأن اتجاه تأثيرهما واحد. طبعاً اتجاه حركة الإطار تعتمد على اتجاه التيار المار فيه وعلى اتجاه خطوط القوى المؤثرة عليه، ويمكن لذلك أن يدور الإطار باتجاه عقرب الساعة أو عكس اتجاه عقرب الساعة واتجاه الدوران للحالة المبينة في شكل 184 (أ) باتجاه عقرب الساعة.

يستمر الإطار بالدوران إلى أن يأخذ موقعاً عمودياً على خطوط القوى عند ذلك تكون هاتان القوتان متساويتين ومتعاكستين في الاتجاه ويتوقف الإطار عن الحركة لعدم وجود قوة خارجية تؤدي إلى ذلك، كما مبين في شكل رقم 184 (ب).

الفصل السادس



الدوائر المغناطيسية

الدوائر المغناطيسية

مقدمة:

لقد عرفنا من دراستنا لمبادئ الكهرومغناطيسية في الفصل السابق بأن مرور التيار الكهربائي في ملف يتكون من عدد من اللفات يعطي ما يسمى بالقوة الدافعة المغناطيسية التي تكون السبب في خلق الفيض المغناطيسي المسؤول عن نقل الطاقة بين أجزاء الدائرة المغناطيسية. يتكون الفيض المغناطيسي من مجموعة خطوط قوى يفترض أن يكون لها مسارها الخاص، ولنسمى هذا المسار بالمسلك أو الطريق المغناطيسي Magnetic Path. مادة المسلك المغناطيسي هي المعدن بشكل رئيسي ويمكن أن تكون من الخشب، الورق، الهواء أو أية مادة مغناطيسية أو غير مغناطيسية أخرى. ويسمى المسلك المعدني في الأجهزة الكهربائية عادة بالقلب الحديدي Iron Core. لهذا فإن الملف الكهربائي والمسلك المغناطيسي هما المكونتان الرئيسيتان للدائرة المغناطيسية.

وتتشابه الدائرتان الكهربائية والمغناطيسية بشكل كبير بحيث أن جميع القوانين والنظريات التي استخدمت لتحليل الأولى تنطبق على الثانية بكل نجاح. ومن المقارنة بين الدائرتين يتضح أن كل منهما يتكون من مصدر للطاقة كالبطارية مثلاً (الملف ويمر فيه تيار كهربائي) يقدمها للدائرة على شكل قوة دافعة كهربائية (قوة دافعة مغناطيسية) تنتقل إلى أجزاءها المختلفة بواسطة التيار الكهربائي (الفيض المغناطيسي) خلال الأسلاك الكهربائية (المسار المغناطيسي) التي تبدي ممانعة (معاوقة) لهذا المرور.

يجدر بنا، قبل البدء بدراسة الدائرة المغناطيسية، أن نتعرف أولاً على طبيعة المسالك المغناطيسية وخواص المواد التي تتكون منها وتعريف المعاوقة التي تؤثر على مقدار الفيض المار فيها.

ظاهرة التمغنط:

تشير الكثير من التجارب المعروفة في دراسة الخصائص المغناطيسية إلى الارتباط الوثيق بين الظاهرتين الكهربائية والمغناطيسية حيث تستنتج جميعها أنه لا يمكن ان يكون هناك تيار كهربائي دون أن يصاحبه مجال مغناطيسي، كما لا يمكن تكوين المجال المغناطيسي غلا ويكون التيار الكهربائي سبباً في ذلك وتساعد هذه المفاهيم كثيراً في توضيح ظاهرة تمغنط الأجسام والمواد.

تتكون ذرات المواد، حسب التصور الإلكتروني الحديث، من نواة ذات شحنة موجبة تدور حولها الإلكترونات السالبة في مدارات خاصة. وتسمى حركة الإلكترونات هذه بالحركة المدارية. كما تدور الإلكترونات حول نفسها (محاورها) حركة مغزلية تكون السبب في تكوين تيارات دائرية صغيرة، يعطي مجموعها ما يسمى بالعزم المغناطيسي وبالتالي المجال المغناطيسي للذرات. وأثبتت التجارب الكثيرة أن صفات المواد ا لمغناطيسية تتحدد كلياً نتيجة الحركة المغزلية للإلكترونات ولا علاقة لها بحركتها المدارية.

تتجه العزوم المغناطيسية لذرات المواد، قبل وضعها ضمن مجال مغناطيسي خارجي لمغنطتها، اتجاهاً عشوائياً كما مبين في شكل رقم 185 (أ) فتتعاكس وتتصادم مما يجعل محصلة المجال المغناطيسي النهائية للمادة صفراً. عند وضع المادة التي يراد مغنطتها ضمن مجال مغناطيسي خارجي (ملف لولبي يمر فيه تيار كهربائي، مثلاً) تتحرك قسم من التيارات الدائرية الصغيرة تحت تأثير هذا المجال لتأخذ لها شكلاً نظامياً، بشكل مشابه لتحرك الإطار الذي يمر فيه تيار ويقع ضمن المجال المغناطيسي. ويبدو في هذه الحالة وكأن العزوم المغناطيسية للذرات تتجه باتجاه خطوط القوى للمجال المغناطيسي الخارجي، ويقال أن الذرات (أو الجسيمات المكروسوبية المغناطيسية) اصبحت موجهة Aligned كما مبين في شكل رقم 185 (ب). وتساوي المحصلة الكلية للمجال المغناطيسي في هذه الحالة مجموع حالات جميع الذرات الموجهة بالإضافة إلى المجال المغناطيسي الخارجي، ويقال أن المادة قد

تمغنطت أي اكتسبت المغناطيسية من المجال الذي وضعت فيه وتصبح لهذا مؤثرة على شدة هذا المجال. تختلف المواد من ناحية قابليتها على التمغنط أو إزالة التمغنط ويسمى المقدار الذي يحدد هذه القابلية ونوعيتها بالنفاذية المغناطيسية المطلقة.

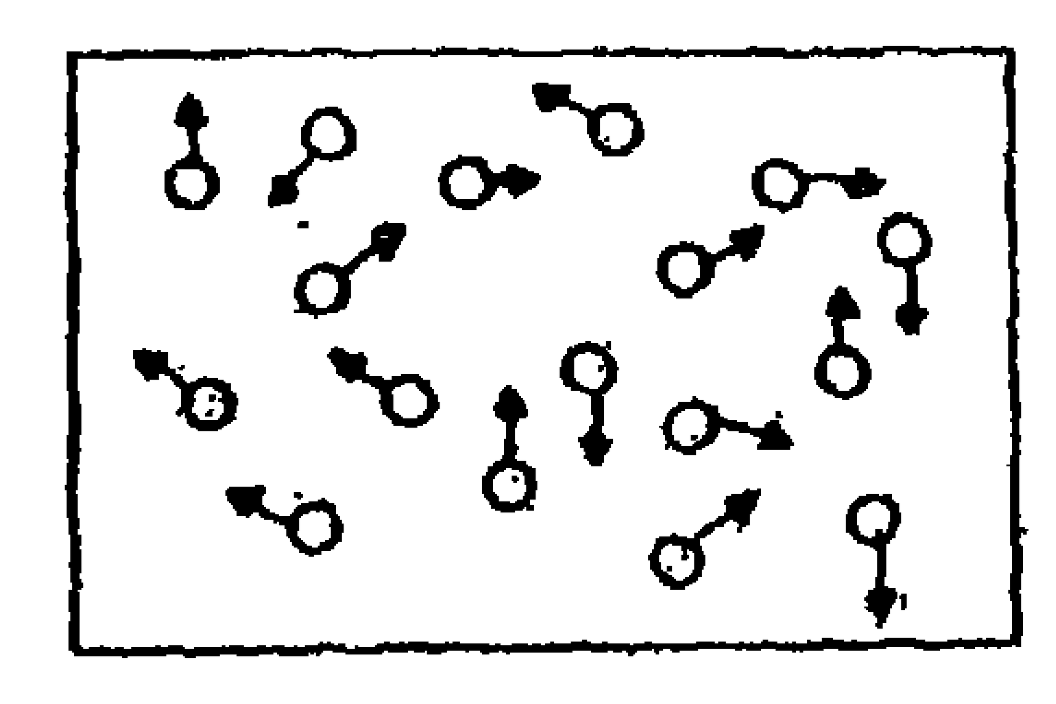
أن موضوع إزالة التمغنط يكتسب في التطبيقات العملية أهمية موازية تقريباً لموضوع التمغنط. أن الطريقة المثلى لإزالة التمغنط هي بتسخين المادة التي يراد إزالة مغناطيسيتها، حيث ترجع الحرارة الذرات ثانية إلى حركتها العشوائية. وتصبح محصلة المجال المغناطيسي للمادة صفراً عند درجة حرارة معينة تسمى بنقطة كوري Curie Point. فالحديد مثلاً يبلغ نقطة كوري، أي إزالة التمغنط كلياً، عند درجة حرارة 760 مئوية تقريباً.

النفاذية المطلقة والنفاذية النسبية:

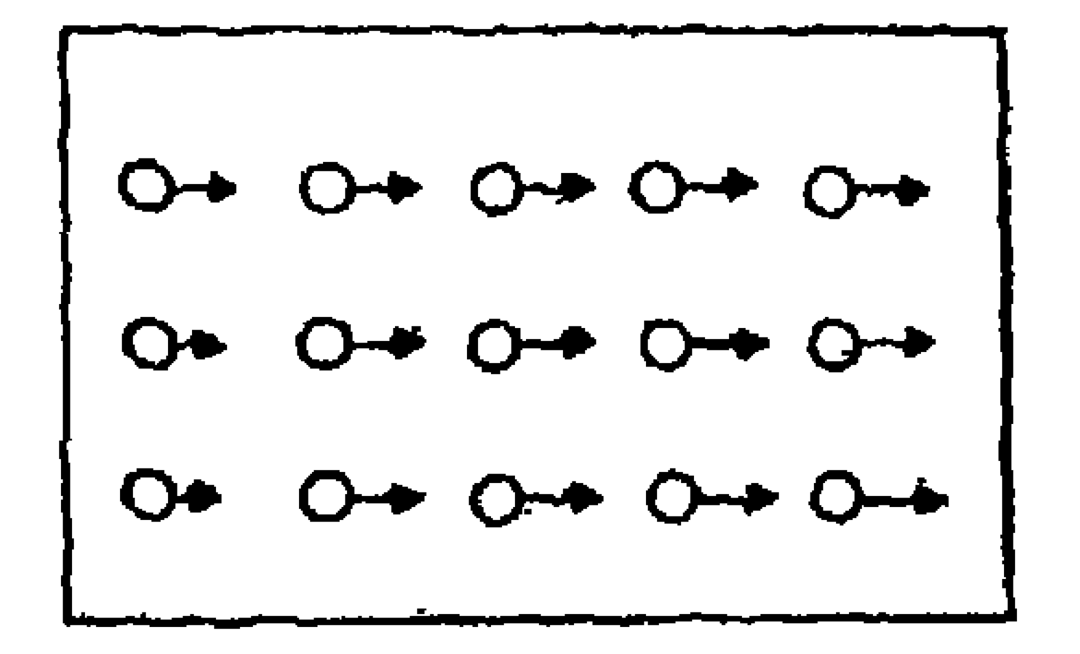
إن الدليل إلى معرفة خصائص المواد المغناطيسية يكون دائماً من خلال معرفتنا لنفاذيتها المغناطيسية، وسنخصص هذا البند لدراسة موضوع النفاذية المطلقة والنسبية للمواد.

لنستخرج أولاً النفاذية المطلقة للهواء أو للفراغ المطلق. نفرض أن موصل معين على شكل إطار يقع في فراغ مطلق ويمر فيه تيار كهربائي مقداره أمبير واحد، إذن القوة الدافعة المغناطيسية التي تسبب المجال المغناطيسي لهذا التيار مقدارها أمبير لفة واحدة.

$$F=IN=1[AT]$$



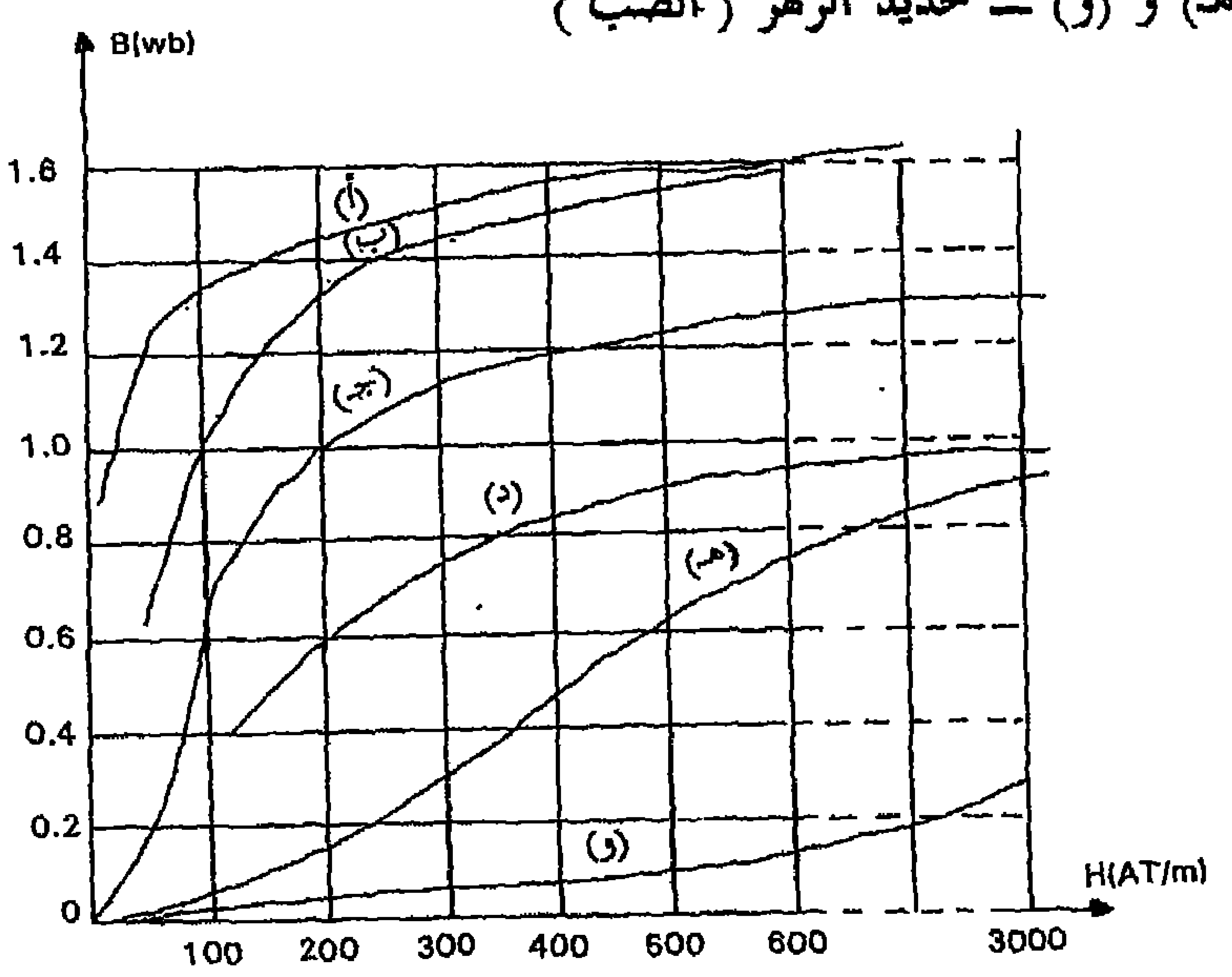
أ ـــ قبل التمغنط



ب ـــ بعد التمغنط

شكل رقم ١٨٥
تفسير ظاهرة التمغنط والتخلفية

(أ) و (ب) ـــ صفائح الفولاذ السليكوني
(جـ) و (د) ـــ فولاذ الصب
(هـ) و (و) ـــ حديد الزهر (الصب)



شكل رقم ١٨٦
منحنيات التحفظ لمواد مختلفة

نفرض أيضاً أن المسافة بين جانبي الإطار العلوي والسفلي كبيرة جداً وأن الإطار مفرط في الطول. لنبحث التأثير المغناطيسي لمرور التيار في جانب واحد فقط من الإطار. كما هو معروف فإن المجال المغناطيسي سيتمثل بخطوط قوى على شكل دوائر مركزية يتطابق مركزها مع المحور الطولي لهذا الجانب من الإطار. لنأخذ أحدى الدوائر، مثلاً التي تقع على بعد متر واحد من هذا المحور ونستخرج شدة المجال فيها. بما أن محيط هذه الدائرة (أو طول خط القوى) يساوي 2π متر، اذن

$$H=F/l = 1/2\pi \ [A/m]$$

إذا فرضنا أن موصلاً آخر، موازياً لجانبي الإطار، يقع على هذه الدائرة ويمر فيه تيار مقداره أمبير واحد، فإن القوة المؤثرة عليه لكل متر طول تساوي:

$$f= BI_2[N] = 2 \ X \ 10^{-7} \ I_1I_2/d[N]$$

إذن كثافة الفيض المغناطيسي تساوي:

$$B=2 \ X \ 10^{-7} \ [Tl]$$

ذكرنا في الفصل السابق بأن النفاذية في نقطة ما تساوي نسبة كثافة الفيض إلى شدة المجال أو:

$$\mu=B/H=2\pi \ X \ 2 \ X \ 10^{-7} = 4\pi \ X \ 10^{-7}$$

ووحدة هذا المقدار هي:

$$[\mu] = \frac{Wb / m^2}{A / m} = \frac{V - sec}{A.m} = \frac{ohm - sec}{m} = H/m$$

إن النفاذية التي تم إيجادها قبل قليل هي للفراغ المطلق Vacuum أو للفضاء الحر Free Space وستكون هي المقياس لتقدير نفاذية باقي المواد. لهذا

سنميزها بوضع لاحقة بعد الحروف (ميو) أي رمزها هو μ_0 وهذه النفاذية هي أيضاً نفاذية الهواء والخشب والكارتون وجميع المواد غير المغناطيسية الخرى وتساوي مقداراً ثابتاً هو:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = 12.57 \times 10^{-7} \approx \frac{5}{4} \ [\mu H/m]$$

أي واحد وربع مايكرو هنري لوحدة الطول. وننصح الطالب بحفظ واستخدام التعبير التالي عند حساب الدائرة المغناطيسية:

$$\mu 0 = 4\pi \ X \ 10^{-7} \ H/m$$

كل مادة سواء كانت قابلة للتمغنط أم لا، لها نفاذيتها الخاصة بها والتي تسمى بالنفاذية المطلقة Absolute Permeability ويرمز لها بالحرف (ميو) μ دون لاحقة. ويعبر عن النفاذية المطلقة أحياناً من خلال التقبلية كما يلي:

$$\mu = 1 + 4\pi X$$

حيث أن X هي التقبلية المغناطيسية Magnetic Suseptibility التي يحدد مقدارها قابلية المادة على التمغنط. فتقبلية المواد المغناطيسية تكون مقداراً كبيراً موجباً $(X >> O)$ بينما تقبلية المواد غير المغناطيسية فتتراوح بين $X = \pm 10^{-6}$.

أن النفاذية المطلقة للهواء ولباقي المواد غير المغناطيسية هي:

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \ X \ 10^{-7} \ H/m$$

أما للمواد المغناطيسية فيعتمد مقدارها على طريقة تحضير المادة وعلى مكوناتها. وترفق مصانع الصلب عادة مع منتوجاتها من المعادن وسبائكها جداول تبين العلاقة بين كثافة الفيض وشدة المجال لهذه المواد، وتسمى هذه العلاقة بمنحنى التمغنط Magnetisation Curve أو B – H Curve كما مبين في

شكل رقم 187 حيث أنها ترتفع من نفاذية ابتدائية معينة μ_a وتزداد بسرعة لتصل إلى النفاذية القصوى μ_m ثم تهبط بشكل تدريجي. طبعاً طبيعة هذا التغير تفسر شكل منحنى التمغنط للمادة المعينة. أما النفاذية المطلقة للمواد غير المغناطيسية فهي مقدار ثابت، لهذا فإن منحنى تمغنطها عبارة عن خط مستقيم يبدأ من بداية الإحداثيات ويميل بزاوية ثابتة على المحور الأفقي مقدارها

$$A=\tan^{-1}(B/H)=\tan^{-1}\mu_0$$

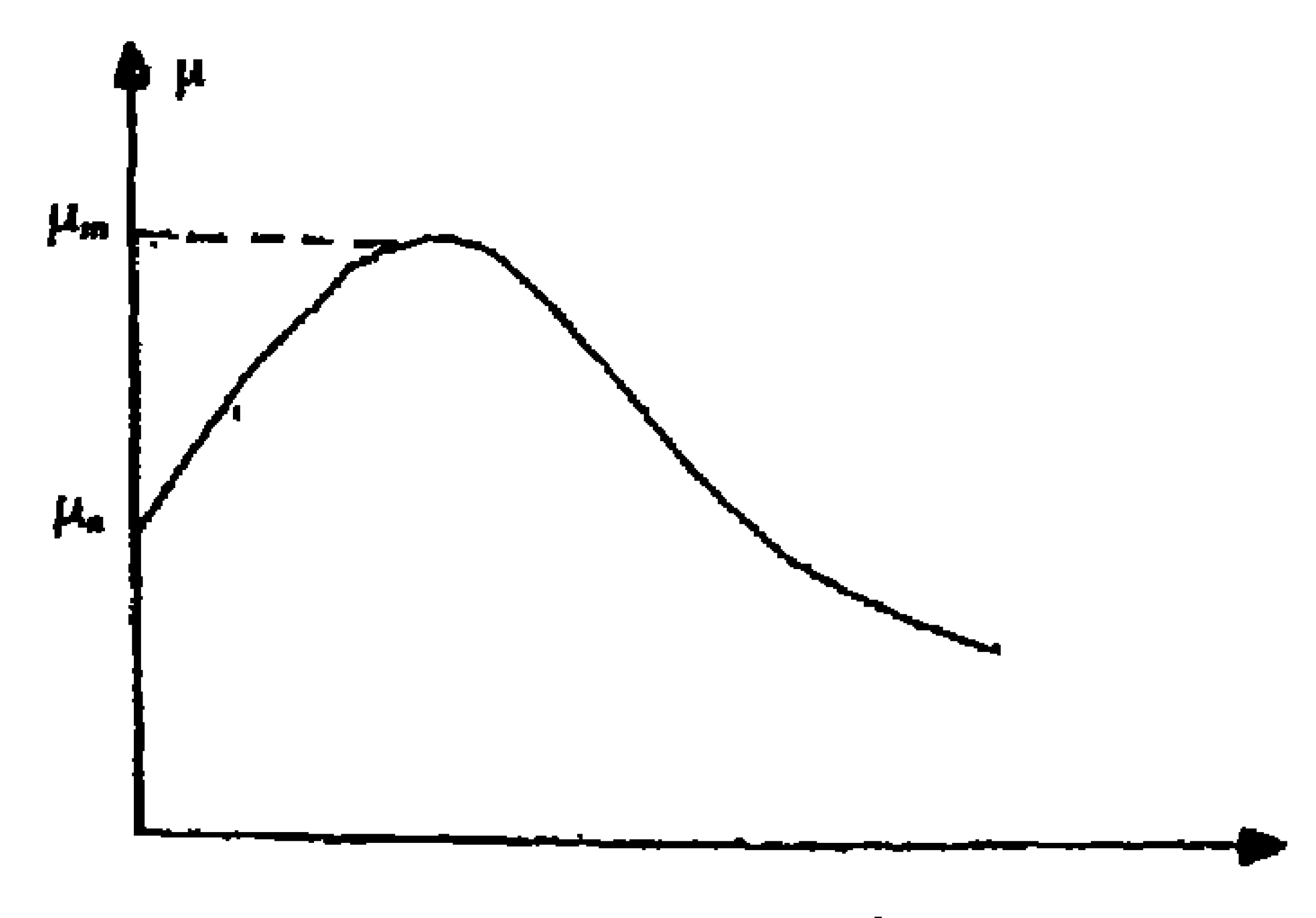
نسبة النفاذية المطلقة للمواد إلى نفاذية الفراغ المطلق تسمى بالنفاذية النسبية Relative Permeability ويرمز لها بالحرف μ_r وهي مقدار بدون وحدات. وتبين النفاذية النسبية عدد المرات التي تزيد فيها (أو تقل) نفاذية المادة المعينة على نفاذية الفراغ المطلق، أو:

$$\mu_r=\mu/\mu_0$$

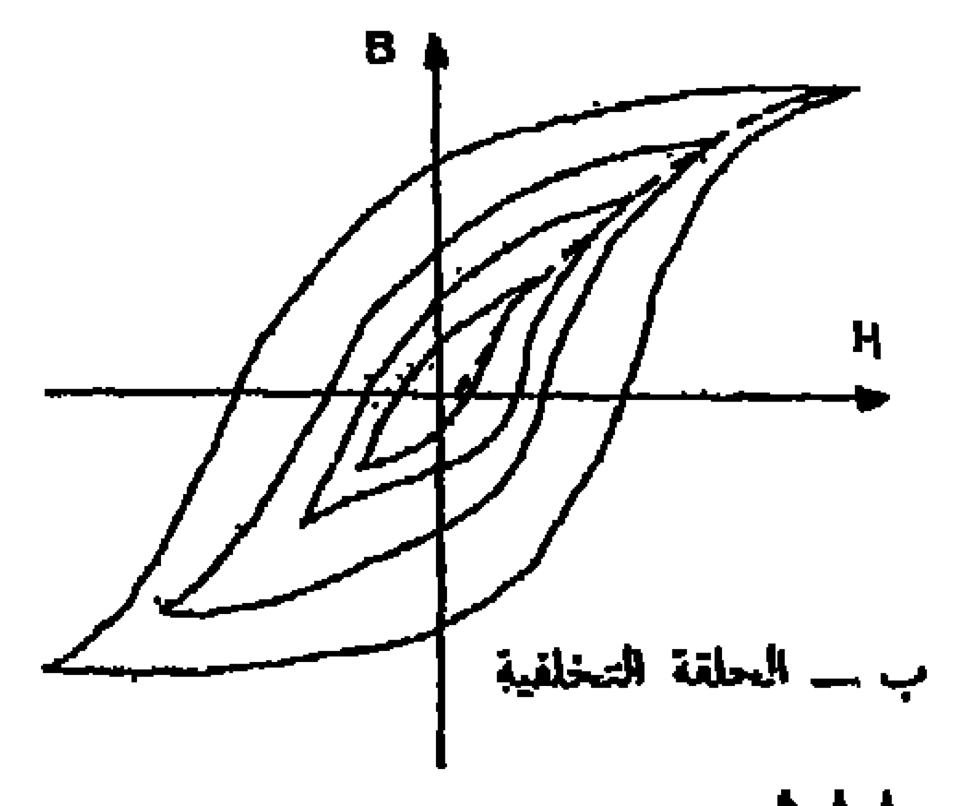
لهذا سنعبر عن النفاذية المطلقة للمواد عادة كما يلي:

$$\mu=\mu_r\mu_0$$

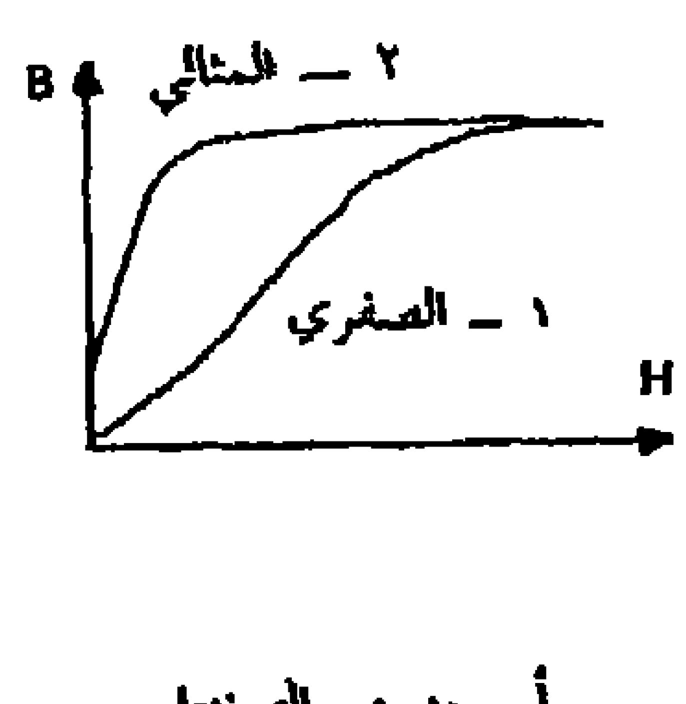
يمكن تقدير الخصائص المغناطيسية للمواد من معرفتنا لنفاذيتها النسبية. وواضح أن النفاذية النسبية للهواء وباقي المواد غير المغناطيسية هي واحد، بينما تزيد على عشرات الألوف في بعض المواد المغناطيسية كسبائك الحديد والنيكل والكوبلت.



شكل رقم ١٨٧
علاقة نفاذية المغناطيسية مع كثافة الفيض

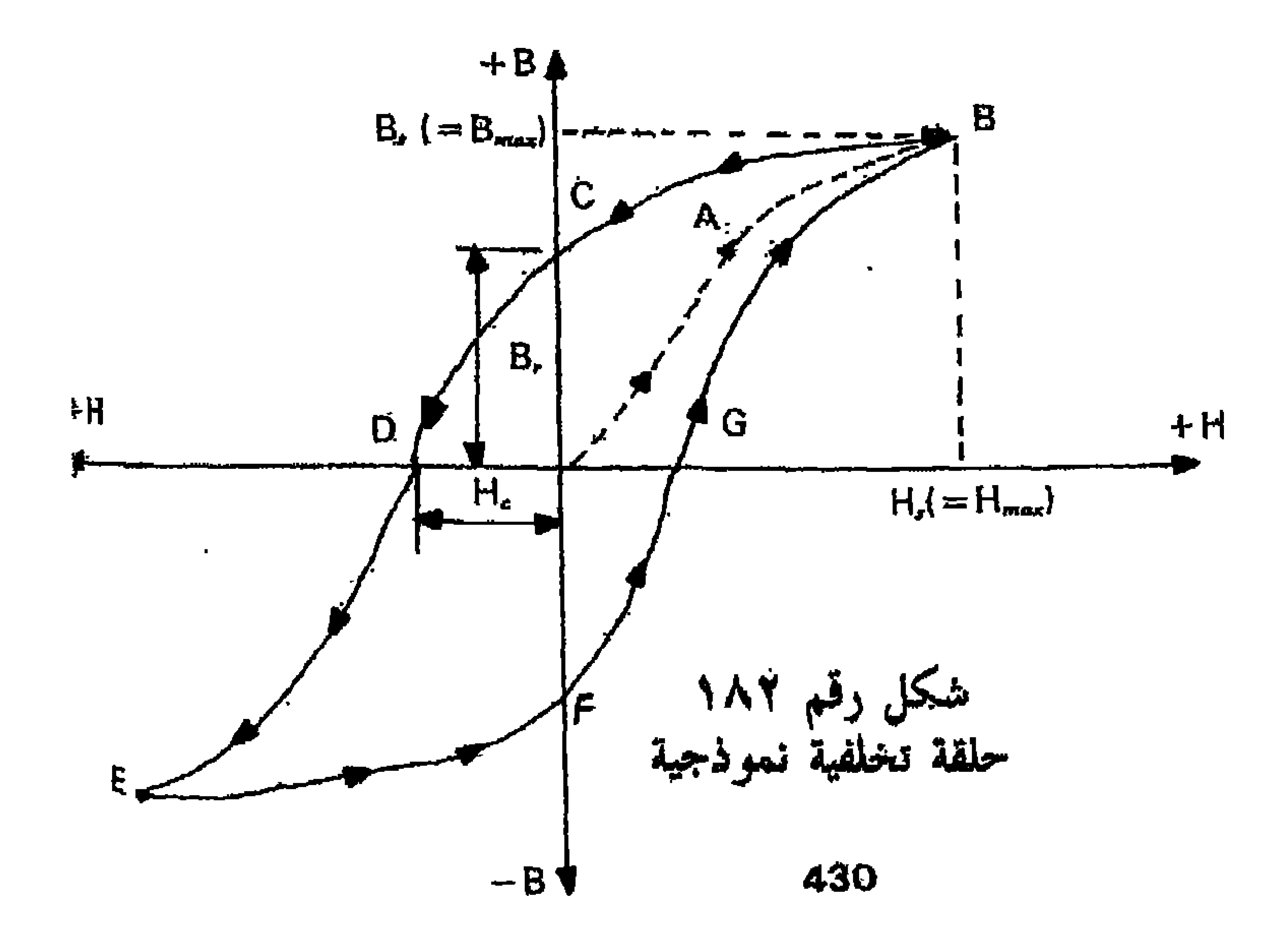


ب ــ الحلقة التخلفية



أ ــ منحنى التمغنط

شكل رقم ١٨٨
منحنى التمغنط والحلقة التخلفية



شكل رقم ١٨٢
حلقة تخلفية نموذجية

قابلية التمغنط عند المواد:

ذكرنا قبل قليل بأن قابلية المواد على التأثير في المجال المغناطيسي الذي توضع فيه تسمى بظاهرة التمغنط، وأن المواد ذات القابلية العالية على التمغنط تسمى بالمواد المغناطيسية وإلا فتسمى بالمواد غير المغناطيسية. وتقسم المواد بشكل عام حسب نفاذيتها أو تقبليتها المغناطيسية إلى ما يلي:

أولاً: المواد الفيزومغناطيسية Ferromagnetic Materials:

هي المواد التي تتميز بخاصية الانجذاب أو التنافر القوي مع المغناطيسيات. وتتمغنط هذه المواد بشدة عند وضعها في مجال مغناطيسي خارجي حيث يؤثر هذا المجال على جزيئاتها المكروسكوبية المغناطيسية فيوجهها باتجاه مسار خطوطه، فتكون محصلة ذلك تقوية كبيرة للمجال المغناطيسي. المواد الفيرومغناطيسية التي تفقد مغناطيستها وتعود إلى حالتها الطبيعية بعد زوال تأثير المجال الخارجي تسمى بالمواد الفيرومغناطيسية اللدنة Soft F. M.، اما التي تحتفظ بمغناطيستيها المكتسبة فتسمى بالمواد الفيرومغناطيسية الصلدة Hard F.M. أو بالمغناطيسيات الدائمة Permanent M.

التقبلية المغناطيسية للمواد الفيرومغناطيسية تكون موجبة وكبيرة جداً (X>>O) كذلك نفاذيتها النسبية التي تتراوح من عدة مئات إلى عشرات الألوف. والمواد الفيرومغناطيسية الوحيدة هي الحديد (تصل نفاذيتها النسبية إلى 5000) والنيكل (300) والكوبلت (150). وتشكل سبائك هذه المواد فصيلة مهمة من المواد الفيرومغناطيسية التي تستخدم في الصناعات الكهربائية لتصنيع الأجزاء الرئيسية لبعض الأجهزة والأدوات. فنفاذية سبيكة النيكل والحديد مثلاً (80٪ نيكل + 20٪ حديد) تصل إلى 20000 وعند استخدام التعامل الحراري المناسب تصل إلى 100000. في أغلب التطبيقات العملية لا نحتاج إلى هذه النفاذية العالية، لهذا نختار نسب مكونات السبيكة لتعطي نفاذية نسبية بحدود 5000 تقريباً حيث يقل كثيراً الفقدان المغناطيسي في هذه السبائك عند كثافة الفيض الواطئة.

من السبائك المعروفة والمستعملة كثيراً في الصناعات الكهربائية هي البرملوي Permalloy التي تزيد نفاذيتها على 100000 وتتكون من:

حديد (18٪) + نيكل (78.5٪) + منغنيز (0.5٪) + موليبدين (3٪) Molybdenum والموميتال Mumetal التي تكون نفاذيتها النسبية أقل من البرملوي إلا أن مقاومتها النوعية أعلى وتتكون من:

حديد (17٪) + نيكل (78٪) + نحاس (5٪)

وتوجد سبائك متنوعة أخرى للنيكل والحديد تضاف إليها بعض المعادن الأخرى للحصول على خصائص مغناطيسية معينة. كما توجد سبائك كثيرة للكوبلت والحديد لا تقل أهمية عن السبائك أعلاه. ويؤثر التعامل الحراري وطريقة التبريد أثناء التصنيع بوضوح على الخصائص المغناطيسية لهذه السبائك. ومن المعروف عن هذه السبائك، أنها تتشبع بسرعة عند كثافة الفيض الواطئة لهذا فهي تستعمل بشكل رئيسي لأجهزة القياس ولا تستعمل بتاتاً في المكائن وبعض الأجهزة الكهربائية الأخرى.

ويمكن تلخيص صفات المواد الفيرومغناطيسية بما يلي:

أ. لها تركيب بلوري خاص بها، وتتكون من جزيئات مكروسكوبية مغناطيسية.

ب. لها نفاذية مغناطيسية موجبة وعالية تتأثر كثيراً بشدة المجال والحرارة.

ج. لها قابلية على التمغنط حتى الإشباع عند درجات الحرارة الاعتيادية حتى لو كان المجال المغناطيسي ضعيفاً.

د. لها صفة التخلفية أو علاقة الصفات المغناطيسية الحالية بالحالة المغناطيسية السابقة (لها تاريخ مغناطيسي).

ه. لها درجة حرارة عند تجاوزها تفقد خواصها المغناطيسية، وتسمى نقطة كوري.

ثانياً: المواد الديامغناطيسية Dimagnetic materials:

هي المواد التي تتميز بصفة التنافر الضعيف عند تقريبها من المغناطيسيات وتتوجه جزيئاتها المغناطيسية، عند وضعها ضمن مجال مغناطيسي خارجي، بشكل بحيث تكون محصلة عزومها المغناطيسية معاكسة لاتجاه المجال المغناطيسي الخارجي، فيكون دورها بذلك أضعافاً لهذا المجال ولذلك فهي تسمى بالمواد الديامغناطيسية (أي ضد المغناطيسية). وخير ممثل لهذه المواد هو النحاس، الفضة الرصاص، الزنك، الخشب، الزئبق، البرافين، الماء ... الخ. النفاذية النسبية لهذه المواد أقل من الواحد بقليل ($\mu_r \leq 1$) فهي للنحاس مثلاً تساوي 0.999992، وتقبليتها المغناطيسية سالبة دائماً وتتراوح بين 10^{-6} و10^{-3} فهي مثلاً:

للخشب $X = -0.5 \times 10^{-6}$

وللبرافين $X = -0.58 \times 10^{-6}$

ثالثاً: المواد البارامغناطيسية Paramagnetic Materials:

هي المواد التي تتميز بصفة الانجذاب الضعيف عند تقريبها من المغناطيسات كما تتمغنط بشكل ضعيف جداً عند وضعها ضمن مجال مغناطيسي خارجي، حيث يتطابق اتجاه عزومها بشكل ما مع اتجاه خطوط هذا المجال. ومن أهم المواد البارامغناطيسية هي الألمنيوم، المغنيزيوم، المنغنيز، البلاتينيوم، التنكستون الهواء، الاوكسجين... الخ. النفاذية النسبية لهذه المواد تزيد قليلاً جداً على الواحد ($\mu_r \geq 1$) فهي للهواء مثلاً تساوي 1.0000031، وتقبليتها المغناطيسية موجبة دائماً وتتراوح بين 10^{-6} و10^{-3} فهي مثلاً:

للألمنيوم $X = 0.65 \times 10^{-6}$

وللهواء $X = 3.1 \times 10^{-6}$

التخلفية والحلقات التخلفية:

أهم الخصائص المميزة للمواد المغناطيسية (الفيرومغناطيسية) مقارنة مع المواد غير المغناطيسية (الديامغناطيسية والبارامغناطيسية) هي العلاقة بين كثافة الفيض وشدة المجال تكون على شكل منحنى يسمى بمنحنى التتمغنط. ويتأثر هذا المنحى كثيراً بالحرارة، الشد الميكانيكي وبصفات المادة قبل مغنطتها (التاريخ المغناطيسي للمادة). وغالباً ما يتم الحصول على هذه المنحنيات عن طريق إزالة التمغنط بتقليل شدة المجال إلى أن تصل كثافة الفيض إلى الصفر بحيث لا تبقى في المادة جزئيات مكرسوبية موجهة، أي تعود إلى حركتها العشوائية مرة أخرى، وتغير اتجاه التيار مرات عديدة أثناء ذلك. بعد ذلك نمغنط المادة ثانية ونرسم منحنى العلاقة بين B وH. سبق أن ذكرنا بأن افضل طريقة لإزالة التمغنط هي بزيادة درجة حرارة المادة عمليا فهي لا تستعمل في الحالات الاعتيادية. عند إعادة مغنطة المادة التي أزيلت مغناطيسيتها قبل قليل، نحصل على الأنواع الممكنة التالية لمنحنيات التمغنط:

أ. منحنى التمغنط الصفري أو الابتدائي، وهو الذي يمر في بداية الإحداثيات ويتكون نتيجة الزيادة التدريجية والمتوازنة لشدة المجال، منحنى (1) في شكل رقم 188 أ.

ب. منحنى التمغنط المثالي، هو الذي تكون فيه قيمة كثافة الفيض صفراً عندما تكون شدة المجال صفراً، غلا أن زيادة كثافة الفيض والدخول في مرحلة التشبع تكون سريعة، منحنى (2) في شكل رقم 188 أ.

ج. منحنى التمغنط الأساسي، هو المحل الهندسي لقمم المنحنيات الحلقية الناتجة عنمغنطة وازالة تمغنط المادة الدوري كما مبين في شكل رقم 188 ب. يلاحظ هنا أن المنحنى الأساسي يتطابق تقريباً مع المنحنى الصفري.

لا يمكن استخدام المنحنى الصفري لتقييم الخصائص المغناطيسية للمادة عند تصميم أجهزة الهندسة الكهربائية لأنه يتحدد لأسباب عرضية خاصة وتكون

لهذا المنحنى اهمية معينة عند ا لفيزياويين فقط. أما المنحنى المثالي فنادراً ما يستعمل نتيجة حساسيته تجاه تغير المجال حيث أن بلوغه حالة الإشباع بسرعة، بغض النظر عن نوع المادة المغناطيسية وعند المجالات الضعيفة، يحدد كثيراً من استعماله، ومع هذا يجد له في بعض المجالات مكاناً للاستعمال. ولهذا يكون منحنى التمغنط الأساسي هو الأهم في تحديد خصائص المواد المغناطيسية ويستعمل بشكل واسع خصوصاً للمواد الموضوعة في مجالات التيار المستمر.

ومن النظر إلى المنحنى الأساسي المبين على شكل خط منقط في شكل رقم 188ب ويمكن تميز الأجزاء التالية فيه:

أ. الجزء السفلي من المنحنى: يقع قرب بداية الإحداثيات ويكون على شكل خط مستقيم تقريباً ويميل مع المحور الأفقي بزاوية تعتمد على μ_a

ب. الجزء الوسطي من المنحنى. يكون على شكل متقوس ويسمى بالركبة Knee، ويعتبر أهم جزء في المنحنى حيث تقع كثافة الفيض المختارة لتصميم أغلب الأجهزة والمكائن الكهربائية ضمن هذا الجزء.

ج. الجزء العلوي من المنحنى ت يبدأ المنحنى هنا بالاستقامة بحيث يصبح موازياً تقريباً للمحور الأفقي، ويسمى بمنطقة الإشباع حيث أن زيادة شدة المجال لا تؤثر على زيادة التمغنط (كثافة الفيض) لأن جميع الجزئيات المكروسكوبية تكون هنا قد توجهت باتجاه خطوط المجال الخارجي ولا تأثير لزيادة شدة المجال عند ذلك على عملية التمغنط أو توجه الجزئيات.

عند إعادة عملية التمغنط بشكل دوري لمادة ما نحصل على منحنيات علىشكل حلقات مغلقة تمثل العلاقة بين شدة المجال وكثافة الفيض وتسمى بالحلقات التخلفية Hystresis Loops وأحياناً "بانشوطة الهسترة". كما مبين في شكل رقم 188 ب، أما شكل رقم 189 فيبين حلقة نموذجية متكاملة.

للحصول على الحلقة التخلفية للمادة الموضوعة ضمن مجال مغناطيسي ثابت ناتج عن مرور تيار مستمر في الملف، نضطر إلى تهيئة أو تحضير هذه المادة

بزيادة تيار التمغنط إلى مقداره المقرر ثم نبدا بتغير اتجاهه بشكل دوري لعدة مرات (حوالي 5– 10 مرات). أما في المجالات المتناوبة فلا حاجة هناك إلى هذا التحضير حيث أن التيار نفسه يتغير من السالب إلى الموجب دورياً. يمكن تلخيص كيفية الحصول على الحلقة التخلفية رجوعاً إلى شكل رقم 189، بما يلي:

أولاً: نزيد شدة المجال تدريجياً فتزداد كثافة الفيض أيضاً حسب المنحنى OAB الذي سميناه بالمنحنى الصفري فنلاحظ عند زيادة شدة المجال قليلاً تزداد كثافة الفيض ببطء وعلى شكل خط مستقيم، بعدها تبدأ كثافة الفيض بالزيادة السريعة مكونة ركبة المنحنى، يليها الجزء الأخير الذي يكون فيه تغير كثافة الفيض طفيفاً بالرغم من الزيادة الكبيرة في شدة المجال، فتأخذ كثافة الفيض في هذا الجزء قيمتها القصوى B_{max} التي تسمى أيضاً بكثافة فيض الإشباع B_s. ان شدة المجال التي تسبب كثافة الفيض القصوى هي شدة المجال القصوى H_{max} والتي تسمى أيضاً بشدة مجال الإشباع H_s. وتختلف المواد من حيث قيمة كثافة الفيض القصوى فهي مثلاً للحديد النقي 2.16 وللنيكل 0.6 وللكوبلت 1.7 تسلاً.

ثانياً: نقلل شدة المجال تدريجياً إلى الصفر فيتغير منحنى التمغنط حسب BC. نلاحظ أنه عندما تكون شدة المجال صفراً فإن كثافة الفيض لا تكون كذلك بل تساوي مقداراً معيناً هو OC يسمى بالمغناطيسية المتبقية Residual Magnetism ويتمثل بكثافة الفيض المتبقية B_r التي تساوي تقريباً نصف كثافة فيض الإشباع.

$$B_r=B_s/2 \qquad (14-2)$$

وتفسير المغناطيسية المتبقية هذه بأنها نتيجة لتخلف الجزيئات المكروسكوبية المغناطيسية التي توجهت نتيجة لتأثير المجال المغناطيسي الخارجي في الرجوع إلى حالتها السابقة بعد زوال تأثير هذا المجال.

ثالثاً: نزيد شدة المجال ثانية ولكن في الاتجاه المعاكس (أي نغير اتجاه التيار المار في الملف ونزيد مقداره تدريجيا) فنحصل على منحنى التمغنط CD واهم ما يميز هذا المنحنى هي نقطة D، أي شدة المجال الضرورية لإرغام كثافة الفيض المتبقية للهبوط إلى الصفر والتي تسمى بالقوة المرغمة أو القوة القهرية Coercive Force أي القوة الضرورية لإزالة المغناطيسية المتبقية. تمثل هذه القوة بالمقدار OD ويرمز لها بالحرف H_c. قلة القوة القهرية تعني أن التغلب على تخلفية الجزئيات المكرسكوبية يكون أسهل والشغل المطلوب لذلك أقل.

رابعاً: نستمر في زيادة شدة المجال إلى أن نصل إلى النقطة E التي تقابل شدة مجال الإشباع أو شدة المجال القصوى $(-H_{max})$ نقلل شدة المجال تدريجياً إلى الصفر فنحصل على نقطة F التي تتناسب مع $(-B_r)$. نزيد شدة المجال في الاتجاه الموجب إلى نصل إلى نقطة G ونستمر في الزيادة حتى نصل إلى نقطة B ثانية حيث تكتمل بذلك الحلقة المغلقة التي سميناها الحلقة التخلفية ويمثلها المنحنى حسب الأحرف من اليسار إلى اليمين.

$$B - C - D - E - F - G - B$$

توجد الكثير من الملاحظات عن الحلقات التتخلفية التي يمكن إجمالها بشكل عام بما يلي:

أ. تتم زيادة أو تقليل شدة المجال بزيادة أو تقليل تيار التمغنط المار في الملف المسبب للمجال المغناطيسي، ويتغير اتجاه شدة المجال بتغيير اتجاه تيار التمغنط هذا. يتم الحصول على الحلقة التخلفية المعينة لقيمة تيار تمغنط قصوى معينة. وتتداخل الحلقات التخلفية عند رسمها لقيم قصوى مختلفة لتيار التمغنط كما مبين في شكل رقم 188ب. نلاحظ أن شكل الحلقة التخلفية يعتمد بشكل رئيسي على شدة المجال القصوى H_{max} فعندما يكون هذا المقدار صغيراً يكون شكل الحلقة بيضوياً ويبدأ انف (قمة) الحلقة بالاستطالة كلما ازداد مقدار H_{max} والحلقة النهائية (الخارجية) في الرسم

هي للحالة التي تساوي فيها شدة المجال القصوى شدة مجال الإشباع (H_{max} = H_s) لهذا عند دراسة الخصائص المغناطيسية لمادة يجب رسم الحلقة التخلفية النهائية حيث لا توجد أي فائدة عملية لدراسة الحلقات الأخرى. ويتضح في شكل رقم 189 أن الحلقة التخلفية هي نهائية لأن فيها (H_{max} = H_s).

ب. تتكون كل حلقة من منحنيين متميزين يسمى الأول منهما المنحنى الصاعد (EFGB) ويسمى الثاني بالمنحنى النازل (BCDE) ومقارنة بالمنحنى الأساسي في الربع الأول يكون المنحنى النازل أعلى منه بينما يكون المنحنى الصاعد أوطأ منه، ويفسر الفرق بين المنجنيين الصاعد والنازل بفقد التخلفية التي تتعرض له المادة المعينة.

ج. للحصول على حلقة تخلفية متماثلة بالنسبة لمركز الاحداثيات يجب أن تتساوى شدة مجال الإشباع الموجبة والسالبة ($+ H_s = - H_s$) وتكون الحلقة التخلفية غير متماثلة عندما يكون المجال المغناطيسي نتيجة تراكب مجالين الأول لتيار مستمر والثاني لتيار متناوب.

د. الجزء المهم في الحلقة التخلفية والأكثر تعبيراً عن الخصائص المغناطيسية هو جزء إزالة التمغنط (الواقع في الربع الثاني) المتمثل بالمنحنى CD، وذلك لتحديده المغناطيسية المتخلفة B_r والقوة القهرية H_c.

ه. يعتمد شكل الحلقة التخلفية ليس على نوعية المادة المغناطيسية فحسب بل وعلى مقدار الشوائب الموجودة فيها، الشد الميكانيكي لها وعلى اتجاه الجزئيات المكروسكوبية المغناطيسية.

و. للمواد المغناطيسية الصلدة حلقة تخلفية عريضة ذات قوة قهرية كبيرة، لهذا يستخدم هذه المواد للحصول على المغناطيسيات الدائمة. أما المواد المغناطيسية اللدنة فلها حلقة تخلفية ضيقة ذات قوة قهرية صغيرة وتكون نفاذية هذه المواد عالية وفقدانها المغناطيسي قليل. لهذا فهي تستعمل بشكل رئيسي في المكائن الكهربائية والمحولات.

الفقدان التخلفي hysteresis Loss:

أن الشغل الضروري للتغلب على تخلفية الجزئيات المكروسكوبية المغناطيسية وتوجيهها باتجاه خطوط القوى للمجال المغناطيسي الخارجي يحتاج إلى الطاقة التي تتحول إلى حرارة وتسمى بالفقدان التخلفي. يتحدد هذا الفقدان ويتناسب مع مساحة الحلقة التخلفية، ويساوي حاصل ضرب حجم المادة المغناطيسية في مساحة الحلقة التخلفية أو

$$Ph=V\oint HdB$$

ووحدة هذا الفقدان تساوي:

$$[P_h] = m^3 \times \frac{A}{m} \times \frac{wb}{m^2} = A \times wb$$

$$= A \times sec \times \frac{wb}{sec} = VA - sec$$

$$= W - sec = Joules$$

لا يعتمد هذا الفقدان الضائع على شكل المواد المغناطيسية أو سمكها (أن كانت من رقائق الفولاذ) ولا على سرعة تغير شدة المجال مع الزمن، بل يعتمد على عدد مرات إعادة التمغنط أو على عدد تردد التيار إذا كان متناوباً. ويمكن التعبير عن الفقدان في وحدة الحجم آخذين بنظر الاعتبار تردد التيار أو عدد مرات التمغنط في الثانية، كما يلي:

$$P_h = \eta f \phi(B) \quad \text{......} \quad (14\text{-}3)$$

ووحدة هذا الفقدان:

$$[P_h] = [J/sec.Kg] = [W/Kg]$$

حيث أن العامل η يعتمد على خواص المادة ويستخرج عمليا فيكون مقداراً ثابتاً للمادة المعينة لذا يمكن استخراجه من الجداول لتردد 50 هيرتس وكثافة فيض مقدارها تسلاً واحدة. ويسمى العامل η بالفقدان النوعي ويكون مقداره صغيراً كلما كانت المادة ذات خصائص مغناطيسية جيدة. فهي مثلاً لرقائق الفولاذ السيليكونية 130، لفولاذ الزهر 2500 ولحديد الزهر 3750، أما لسبيكة الهبرنك Hypernik (حديد 50٪ + نيكل 50٪) التي تستعمل عادة محولات التيار فهي لا تزيد على 25.

والدالة $\varnothing(B)$ هي مقدار معقد اثبتت التجارب أنه يزداد بسرعة في البداية مع زيادة كثافة الفيض ثم يأخذ له مقداراً ثابتاً بعد ذلك. وقد اثبت العالم الألماني الشهير جارلس ستينمتز Steinmetz (1865 – 1923) أن هذه الدالة تساوي كثافة الفيض مرفوعة إلى الاس 1.6 أو

$$\Phi(B) = B^a = B^{1.6}$$

الأسس a يسمى بمؤشر ستينمتز ويساوي للحالات المختلفة مقداراً يتراوح بين 1.6 و4. نحتاج في التطبيقات العملية للصناعات الكهربائية إلى مواد تتراوح حدود كثافة الفيض فيها بين 1، 1.6 تسلا، لهذا يساوي مؤشر ستينمتز هنا اثنان تقريباً، إذن عند تردد f يكون الفقدان في وحدة الحجم.

$$P_h=\eta(f/50)B^2 \ [W/Kg] \qquad (14-4)$$

وهذه المعادلة مناسبة جداً لحساب فقدان التخلفية خصوصاً في المكائن الكهربائية، فهي لتيار تردده 50 هيرتس ولكثافة فيض تجعل مؤشر ستينمتز عدداً صحياً (وليس كسراً).

يمكن تلخيص الملاحظات التالية عن فقدان التخلفية:

أولاً: لما كان فقدان التخلفية يعتمد على مساحة الحلقة التخلفية فإنه سيكون أوطأ في المواد المغناطيسية اللدنة منه في المواد المغناطيسية الصلدة. لهذا لا تستعمل الأخيرة نهائياً عند تصميم الدوائر المغناطيسية للمكائن الكهربائية والمحولات، إلا في حالة نادرة جداً.

ثانياً: يزداد فقدان التخلفية كلما ازداد عدم تماثل الحلقة التخلفية، حيث أن ذلك يؤدي على زيادة مساحتها.

ثالثاً: يقل فقدان التخلفية إذا كان المجال المغناطيسي دواراً Rotating Magnetic Field (وهي الحالة لأغلب المكائن الكهربائية) وليس متناوباً نبضياً فقط. ويقل كثيراً جداً إذا كانت كثافة فيض المجال الدوار عالية (تزيد على 2 تسلا).

رابعاً: يزيد الشد الميكانيكي على الجزيئات المكروسكوبية من فقدان التخلفية فيها، لهذا عند تصنيع المكائن والأدوات الكهربائية ينبغي تجنب الضغط الشديد على القلب المغناطيسي Magnetic Core جهد الإمكان.

أنواع المسالك المغناطيسية:

لقد ذكرنا سابقاً بأن الدائرة المغناطيسية تتكون من مصدر للقوة الدافعة المغناطيسية ومن مسلك مغناطيسي. ولما كان مصدر القوة الدافعة المغناطيسية هو ببساطة الملف الذي يمر فيه تيار فليس هناك ما يستحق التوقف عند هذا الموضوع، أما بالنسبة للمسلك المغناطيسي فيكون عادة من المواد الفيرومغناطيسية ذات القابلية العالية على التمغنط. ويفضل أن يكون المسلك المغناطيسي على شكل حلقة مغلقة دائماً وليس على شكل قضيب سائب الطرفين لأن خطوط القوى للفيض المغناطيسي بطبيعتها تكون حلقات مغلقة ينبغي أن تمر جميعها من خلال هذا المسلك. ويمكن أن يكون هناك قطع في المسلك المغلق يسمى بالفجوة الهوائية

Airgap التي سيتم بحث تأثيرها فيما بعد. تنقسم المسالك المغناطيسية إلى ما يلي:

أ. حسب الشكل الهندسي العام للمسلك إلى:

- مسلك حلقي دائري Toriodal.
- مسلك على شكل حذوة الفرس Horse Shoe.
- مسلك مربع أو مستطيل الشكل Square or Rectangular.

ب. حسب مادة المسلك وأبعاده التي تكون المعاوقة المغناطيسية إلى

- مسلك بسيط ذا معاوقة منتنظمة واحدة Simple M. Paht.
- مسلك مركب من عدة معاوقات Compound M. Path.

ج. حسب عدد الفروع التي يتكون منها المسلك إلى:

- مسلك متوالي يتكون من حلقة واحدة Series M. Path.
- مسلك متوازي يتكون من عدة فروع Parallel M. Path.

د. حسب توزيع الفيض المغناطيسي في فروع المسلك المتوازية إلى:

- مسلك متماثل Symmetrical M. Path.
- مسلك غير متماثل Unsymmetrical M. Path.

حساب الدائرة المغناطيسية:

يتم حساب الدائرة المغناطيسية بشكل عام حسب طريقتين تعتمدان على المعلومات المعطاة عن الدائرة وعلى المطلوب إيجاده فيها وهما:

الطريقة الأولى: تعطي جميع المعلومات الضرورية عن المسلك المغناطيسي والملف ويطلب إيجاد تيار التمغنط الضروري لإمرار فيض مغناطيسي معين في هذا المسلك. وبتتبع الخطوات التالية نستطيع حساب الدائرة:

- نقسم المسلك المغناطيسي إلى أجزاء متميزة حسب معاوقة كل جزء.
- من معرفة الفيض المغناطيسي نجد كثافة الفيض لكل جزء.
- من معرفة منحنى التمغنط لمادة المسلك نجد شدة المجال لكل جزء.
- من معرفة عدد لفات نستخرج تيار التمغنط المطلوب.

الطريقة الثانية: تعطى جميع المعلومات الأساسية عن المسلك والملف ويطلب إيجاد مقدار الفيض المغناطيسي الذي يسببه تيار معين.

سيكون حساب مثل هذه الدوائر صعباً جداً نظراً لعدم معرفتنا مقدار الفيض المغناطيسي وبالتالي كثافة الفيض، لهذا نقوم بالخطوات التالية:

- نفرض قيما معينة لكثافة الفيض في جزء من أجزاء الدائرة ونستخرج كثافة الفيض في الأجزاء الأخرى ولكل قيمة مفروضة لكثافة الفيض.
- نستخدم منحنى التمغنط لمادة المسلك لإيجاد شدة المجال لجميع الأجزاء في جميع الحالات المفروضة لكثافة الفيض.
- نستخرج مقدار الفيض المغناطيسي المار في المسلك لجميع الحالات.
- نستخرج القوة الدافعة المغناطيسية الكلية لجميع الحالات.
- نرسم العلاقة $\Phi|(F)$ التي يمكن بواسطتها إيجاد مقدار الفيض (أو كثافة الفيض) المناسب للقوة الدافعة المغناطيسية المتكونة نتيجة تيار التمغنط المعين.

عند حساب الدائرة المغناطيسية يجب معرفة إبعاد وطبيعة مادة كل جزء من أجزاء المسلك المغناطيسي لتسهيل إيجاد متوسط طول خطوط القوى ومساحة المقطع التي تختارها هذه الخطوط ونفاذية الجزء الذي تمر فيه. لهذا يمكن التأكيد على الملاحظات التالية المهمة قبل الشروع في حساب الدائرة المغناطيسية:

أولاً: متوسط طول المسلك. بغض النظر عن شكل المسلك الذي تمر فيه خطوط القوى، فإن القوة الدافعة المغناطيسية التي تسبب هذه الخطوط تساوي حاصل ضرب شدة المجال في متوسط طول المسلك، أو

$$F = Hl = \sum_{i=1}^{n} H_i l_i \quad \text{...} \quad (14\text{-}5)$$

حيث أن متوسط الطول l يساوي نصف مجموعة المحيطين الخارجي والداخلي للمسلك المنتظم ذي المعاوقة الواحدة، أما l_i فهو متوسط طول الجزء المعين مثلاً i، المتميز بمعاوقته S_i. فإذا كان المسلك على شكل حلقة دائرية قطرها الخارجي D والداخلي D' فإن متوسط طوله يساوي

$$l = \pi(D + D')/2$$

وإذا كان على شكل مستطيل إضلاعه الخارجية a, b والداخلية a', b' فإن متوسط طوله يساوي:

$$l = (a + a') + (b + b')$$

ومتوسط طول المسلك المربع الشكل $(a = b,\ a' = b')$ يساوي

$$l = 2(a + a')$$

ثانياً: مساحة مقطع المسلك. عندما تكون مساحة مقطع المسلك أحدى معطيات الدائرة فلا توجد مشكلة في هذه الحالة، حيث تستخدم مباشرة لإيجاد كثافة الفيض بدلالة قيمة الفيض المعروفة أو بالعكس:

$$B = \Phi/A\ ,\ \Phi = BA$$

وتعطي أحياناً أبعاد المقطع المطلوب إيجاد مساحته، مثلاً القطر أن كان دائرياً أو الضلع أن كان مربعاً أو الضلعين إذا كان مستطيلاً. ويمكن في أغلب الأحيان استنتاج أبعاد المقطع من الرسم التخطيطي للمسلك لتستخدم في إيجاد مساحة المقطع.

ثالثاً: نفاذية أجزاء المسلك. يكون منحنى التمغنط أحدى المعطيات الأساسية في أغلب الأحيان. عندما تختلف أجزاء المسلك في مادتها الفيرومغناطيسية فيجب أن يكون لكل جزء منحناه الخاص قد تتكون بعض أجزاء المسلك من مادة غير مغناطيسية كالهواء، الخشب أو الكارتون مثلاً، فتكون علاقة كثافة الفيض مع شدة المجال في هذه الأجزاء خطية.

$$B = 4\pi \times 10^{-7} \times H$$

رابعاً: وجود فجوة هوائية في المسلك. قد تحتوي بعض الدوائر المغناطيسية على فجوة هوائية ضمن مسلكها فتزداد بذلك معاوقة المسلك الكلية ويقل الفيض المغناطيسي المار فيه نتيجة لتيار تمغنط معين. ويكون طول هذه الفجوة عادة صغيراً جداً بحيث يمكن إهمال تأثيره على متوسط الطول الكليل للمسلك.

خامساً: أن وحدات جميع المقادير المستحصلة لحساب الدائرة المغناطيسية تلخص كما يلي:

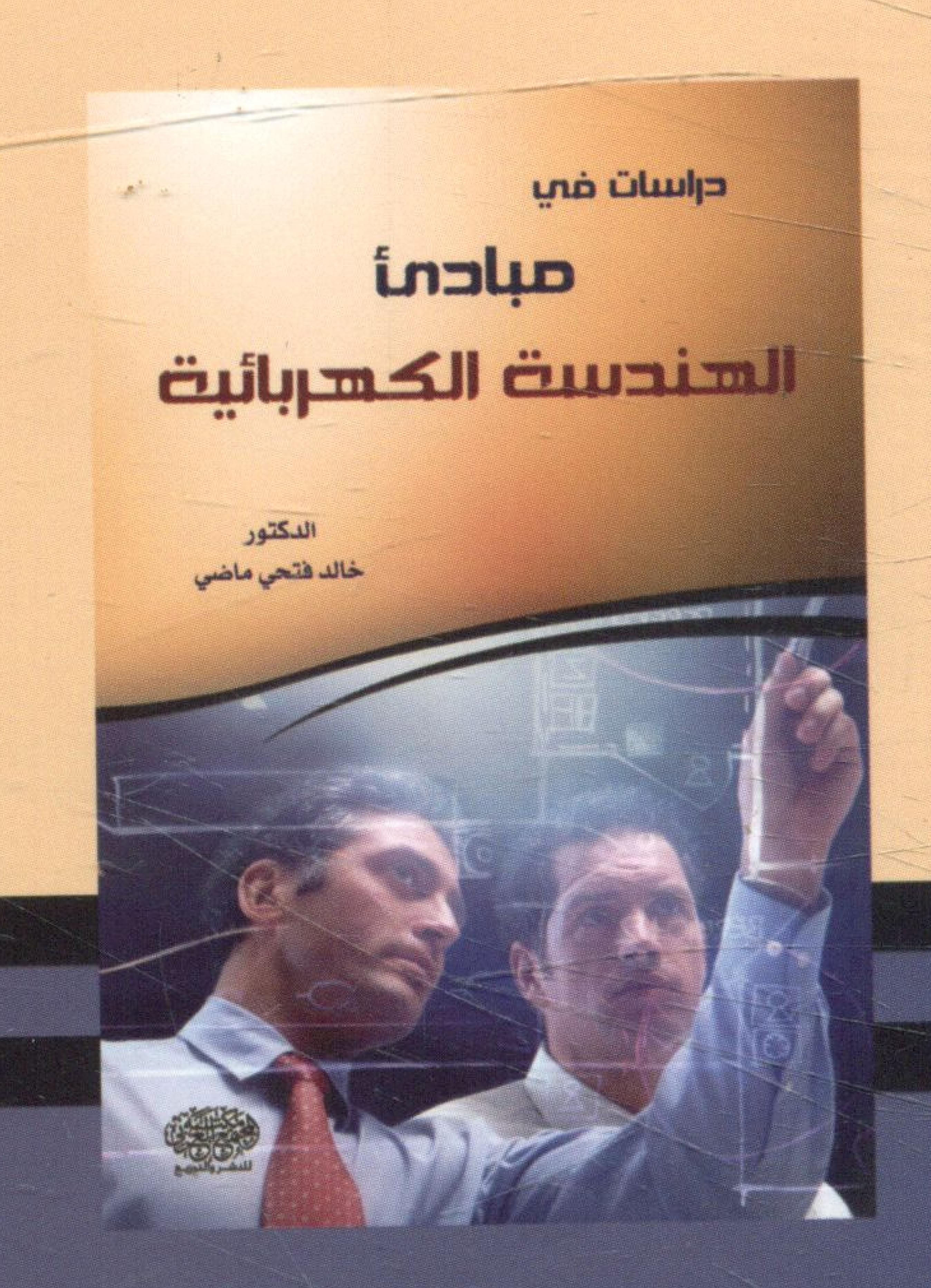
الطول = متر، الفيض = ويبر، كثافة الفيض = تسلا، المساحة = متر مربع، المعاوقة = أمبير— لفة/ ويبر، شدة المجال = امبير— لفة/متر، النفاذية = هنري/ متر.

قائمة المصادر والمراجع

1. مبادئ الهندسة الكهربائية، د.خليل السيد، مكتبة الجامعة، مصر، 2004.
2. الفيزياء الكهربائية، د.عمر حسنين الصعيدي، مكتبة الاسكندرية، 2006.
3. ملخصات من رسالة دكتوراه، د.خالد ماضي، 2001.

دراسات في

مبادئ الهندسة الكهربائية







الأردن-عمان -وسط البلد- ش. السلط - مجمع الفحيص التجاري- تلفاكس : 2739 463 6 962+
خلوي:5651920 79 962+ ص.ب 8244 الرمز البريدي 11121 جبل الحسين الشرقي
الأردن - عمان - الجامعة الأردنية - ش. الملكة رانيا العبدالله - مقابل كلية الزراعة - مجمع زهدي حصوة التجاري
www.muj-arabi-pub.com
E-mail:Moj_ pub@hotmail.com